

КИСЛОРОД

БЮЛЕТЕНЬ

ТЕХНИЧЕСКОГО СОВЕТА ГЛАВКИСЛОРОДА
ПРИ СНК СССР

№ 2

1944

С ЗАСЕДАНИЙ ТЕХНИЧЕСКОГО СОВЕТА

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ОПЫТНЫХ РАБОТ ПО ВНЕДРЕНИЮ КИСЛОРОДА В ГАЗИФИКАЦИЮ НИЗКОСОРТНЫХ ТОПЛИВ*)

Проф. К. Ф. ПАВЛОВ

Доктор технических наук профессор Константин Феоданович Павлов является видным специалистом в области химической аппаратуры и глубокого холода, в особенности в области применения холодильных процессов в химической промышленности, в частности в газификации. В течение 25 лет он вёл преподавательскую работу в Ленинградском Химико-технологическом Институте и консультировал в промышленности. Его перу принадлежит первая монография на русском языке в области глубокого холода «Холод в химической промышленности». К. Ф. Павлов является научным консультантом Технического совета.

В этой статье даётся краткий общий обзор современного топливоснабжения и техники газификации в СССР и в других странах в качестве вступления к более детальным и полным сообщениям по основным методам газификации. Предлагаемый обзор делится на две части. В первой — намечается фон для решения специфических задач газификации в нашей стране, характеризуется топливоснабжение и газификационная техника зарубежных стран. Во второй части оценивается состояние газификации в СССР и намечаются очередные задачи в этой области.

*) Доклад на заседании Технического совета Главкислорода при СНК СССР 5 октября 1943 г.

1. Топливоснабжение и газификационная техника зарубежных стран

Начнём с Соединённых Штатов Америки. Добыча угля в США составляет 500—600 млн. т в год, антрацита и битуминозных углей — по 100 млн. т, нефти — до 120 млн. т. Газовое хозяйство США огромно. Природного газа добывается 80—90 млрд. м³ в год. Это составляет до 5% всего энергетического баланса страны. Коксовальных газов производится 25 млрд. м³, городского газа и водяного — 10 млрд. м³, нефтяного — 15 млрд. м³, технологических газов для синтеза аммиака и других синтезов — вероятно порядка 50—80 млрд. м³. Эта последняя цифра не отражается в официальной статистике.

Передовая техника добычи и использования природного газа — весьма поучительная для нас особенность Соединённых Штатов Америки. Газ этот передаётся на дальнее расстояние, причём предварительно из него извлекается бензин, а сам газ одоризируется. Из дальних газопроводов наибольшим является Пан-Хледский (длина 1375 км, диаметр 24"): он строился полтора года и обеспечен газом на 25 лет. Другой грандиозный газопровод длиной в 1600 км проведён из Амарилло в Чикаго; он пропускает до 8 млн. м³ газа в сутки, т. е. до 3 млрд. м³ газа в год. В строительстве некоторых газопроводов скорость прокладки труб доходила до 5 км в сутки. Масштаб американского газоснабжения будет нам более понятен, если мы вспомним, что для всех электростанций в черте г. Москвы (внутри окружной дороги) требуется при переводе их на газ 8 млрд. м³ газа в год, а для бытовых нужд и первоочередных нужд промышленности Москвы необходимо около 2 млрд. м³ газа в год.

Распределение природного газа в США таково: для бытовых нужд — 20%, промышленности — 25%, нефтяному хозяйству — 43%, производству сажи — 11%. Стоимость природного газа у скважины — до 0,6 коп./м³. Доставка на 1000 км обходится до 1,5 коп./м³. Промышленность вблизи скважины получает газ по 0,9 коп./м³, а в быту он обходится до 4,5 коп./м³. Таким образом 1000 ккал в газе стоят в быту 0,4 коп., в промышленности — 0,1 коп. (1000 ккал в угле стоят 0,25 коп.).

Коксового газа в города поступает 16%, промышленность получает его в количестве 3—4%, металлургия — 40%; собственные нужды коксования составляют 41%.

Водяной газ обычно карбюрируется нефтяным газом. Никаких ограничений в отношении содержания окиси углерода в городском газе в Америке не ставят.

Городской водяной газ вырабатывается в количестве 10 млрд. м³ в год, что составляет около 10% всего газоснабжения США. Электроэнергия вырабатывается около 100 млрд. кВтч в год; из них 60% вырабатывается на топливе, 40% даёт гидроэнергия.

В модернизации техники газификации в США заметны, по литературным данным, большие успехи в улучшении работы коксовальных печей. Тип печей в основном тот же — Копперса-Беккера. Сейчас камеры в них удлинены, высота их увеличена, они ещё более сужены. В целях более равномерного

обогрева горючие газы смешиваются с рециркулирующими топочными газами.

В производстве водяного газа каких-либо нововведений за последние годы нет. Видимо, промышленность США удовлетворяется пока генераторами периодического действия типа Газ-Пауэр-Корпорейшен.

Как видим, США — страна, наиболее одарённая природой по части всех видов ценных топлив. Некоторые элементы газификационной техники, особенно — дальнее газоснабжение, разновидности нефтеперерабатывающих процессов, детали коксовальных печей — могут быть с успехом перенесены и в нашу страну, кстати сказать, во многом по природным ресурсам напоминающую США.

Хотя первые работы по парокислородной газификации топлив проведены в США, в этой стране они никакого практического применения не получили — ввиду обилия природных ресурсов и сравнительно равномерного распределения их по стране.

Англия. Топливоснабжение этой страны довольно просто, поскольку 91,6% его составляет каменный уголь. Нефть импортируется в количестве около 5 млн. т в год. Добыча горючих сланцев составляет около 3 млн. т в год. В Ирландии добывается до 7 млн. т фрезерного торфа.

Городского газа вырабатывается в среднем за последние годы до 10 млрд. м³ в год. Водяного газа на коксе (не считая газа для синтезов) для промышленных и бытовых целей — около 2 млрд. м³ в год. В бытовое потребление передаётся сравнительно мало коксового газа — около 2 млрд. м³ в год.

Технологический газ (водяной), судя по практике Биллингэма, вырабатывается в количестве, превышающем 30 млрд. м³ в год, в генераторах периодического действия значительного диаметра (5,5 м), производительностью до 270 000 м³ в сутки каждый. Описание таких станций не раз давалось в технической литературе. Фирмой Ньютон-Чемберс установлены у нас газогенераторные станции на азотном заводе в Сталиногорске. В Биллингэме имеется синтез аммиака и синтез жидкого топлива на базе водяного газа.

Итак, для Великобритании характерен импорт нефти, развитое потребление городского газа, избыток кокса. Представляет общий интерес процесс полукоксования и получения бездымного топлива, разрабатываемый в Англии.

Парокислородной газификацией, особенно безостаточной (без отхода кокса), в Англии сильно интересуются, но до 1940 года дело ограничивалось, главным образом, усвоением германской техники.

Германия. Запасы углей — основного топливного ресурса — составляют около 345 млрд. т, в том числе бурые угли — 57 млрд. т. Бурые угли Германии содержат до 55% влаги, около 30% золы, т. е. весьма низкосортные, — тем более интересен опыт их широкого использования.

По официальной статистике, охватывающей в основном коксование и производство светильного газа, в Германии вырабатывается в год около 20 млрд. м³ газа (10% всего энергоснабжения, включая и перелет бурого угля). К этой цифре надо добавить не менее 60 млрд. м³ технологического газа для различных минеральных и органических синтезов.

Стоимость технологического газа, видимо, не превосходит 2—2,5 коп. за 1 м³. Коксовый газ стоит 3,5 пфеннига — около 7,5 коп., даже с учётом дальнего газоснабжения. Стоимость городского газа, ввиду малой производительности реторт, доходит (без дальнего газоснабжения) до 15 коп. за м³. Коксовый газ идёт на 90% в промышленность. Линия дальнего газоснабжения до войны тянулась на север до Гамбурга и на юг — к Кобленцу и Кельну.

В части совершенствования газификационной техники в Германии имеют особое значение и представляют большой интерес:

1) Опыты Винклера по паровоздушной и парокислородной газификации низкосортных топлив (бурых углей) в «кипящем» слое.

2) Парокислородная газификация бурого угольных брикетов под давлением.

Этими длительными экспериментальными работами немецкие инженеры разрешили для своей страны большую проблему, — именно, свели в общий баланс энергетического и технологического газа колоссальные запасы бурых углей, на половину состоящих из балласта, сильно сернистых и влажных.

Винклеровский газогенератор газифицирует на силовой и технологический газ бурого угольную мелочь (размеры 3—8 мм). Принципиальная особенность этого газогенератора — газификация мелочи в сравнительно невысоком (до 0,5 м) «кипящем» слое. Слой этот при некоторой подобранной скорости кислородно-парового дутья и определённой температуре ведёт себя, как жидкость. Омываемые газовой

средой мелкие частицы угля бурно выделяют газы. Эти частицы окружены стойкой газовой плёнкой и легко могут перемещаться друг около друга, как частицы жидкости с небольшой вязкостью. Частицы угля как бы плавают в очень подвижной среде, в которой они то подбрасываются вверх, то опять падают вниз. В СССР (Институт азота) этот метод освоен. Сейчас монтируются такие газогенераторы на одном из наших аммиачных заводов.

Размах Винклеровской газификации весьма солиден. По данным Этлофа в 1940 г. в Германии для синтетического бензина производилось до 24 млн. м³ газа в сутки, его вырабатывали, видимо, на 24—30 газогенераторах. Газогенератор в 1 млн. м³ газа в сутки даёт газ в 2,5 коп. за м³ при амортизационных отчислениях до 0,02 коп. на м³.

Собственно за границей это первое и пока единственное применение кислорода в широком промышленном масштабе, т. е. переросшее масштаб опытных установок.

В Германии Винклеровский метод, видимо, применяется, в основном, для получения технологического газа, т. е. газа для синтезов, определённого химического состава, с определённым соотношением окиси углерода к водороду или водорода к азоту. В этом случае не гонятся за калорийностью и не используют даже такого средства обогащения газа, как швелевание, поскольку метан — один из продуктов швелевания — в синтезе аммиака или жидкого топлива бесполезен и даже представляет собой обременительный балласт.

Получение высококалорийного метанистого газа до 5 000 ккал/м³ в агрегатах большой мощности из низкосортных топлив представляет собой отдельную задачу. В большом масштабе она не разрешена в Германии: на дальнее газоснабжение пока здесь передаётся коксовальный газ Рурского бассейна.

Опыты Лурги — Драве по газификации под давлением наметили интереснейший путь решения этой проблемы.

Таким образом, опыт парокислородной газификации крайне низкосортных германских бурых углей, совершенно нетранспортабельных, для производства технологического газа местного потребления (способ Винклера) и опыт парокислородной газификации бурых углей на метанистый, калорийный газ под давлением — вот два главных новых момента в прогрессе газификационной техники, заслуживающие серьёзного изучения.

Остановимся на некоторых интересных для нас техникоэкономических сторонах парокислородной газификации под давлением, позволяющей вполне экономично заменить перевозку низкосортного твердого топлива транспортом высококалорийного газа.

2. Перспективы парокислородной газификации под давлением

Прежде всего уясним себе, как повышение калорийности удешевляет транспорт газа. Ответ на этот вопрос даёт табл. 1.

Таблица 1
Влияние калорийности газа на стоимость его дальнего транспортирования в %

Калорийность газа ккал/м ³	Капиталовложения	Эксплуатационные расходы
1500	115	114
2500	100	100
3000	85,4	87,5
3250	80,5	81
4200	65,5	73
5000	55	63

Сопоставим эту таблицу с характеристикой чистых газов в отношении их теплотворной способности и температуры пламени (см. табл. 2).

Таблица 2
Температура пламени различных горючих газов

Газ	Средняя теплотворная способность в ккал/м ³	Теоретическая температура горения в °C
Окись углерода	3034	2030
Водород	2570	1970
Метан	8562	1870
Коксовальный газ	4230	1835
Газ раторгый газ	1453	1450
Водяной газ	2600	1850
Двойной водяной газ	3040	1825

Как мы видим, для наиболее рентабельной транспортабельности газа необходимо повышение его теплотворной способности до 4 000—5 000 ккал. Приемлема и передача газа калорийностью в 3 000—3 500 ккал/м³. Такой газ вполне удовлетворяет и самое квалифицированное промышленное его потребление. Разбавлением газа в месте потребления, например, коксовальным газом, мы приспособим

его к существующей сети, удешевим его как силовой газ, подведём под уровень санитарных требований.

Отсюда понятно возникновение двух тенденций в современной газификации с одной и той же целью:

- метанирование углерода топлива парокислородным дутьём под давлением;
- метанирование углерода топлива гидрированием его водородом под давлением.

За границей разработка того и другого метода дошла сейчас до стадии больших опытных агрегатов. Отметим подробнее успехи парокислородной газификации под давлением. Изменение состава газа, полученного на парокислородном дутье, как функция давления, характеризуется в табл. 3.

Таблица 3
Газификация кокса под давлением

	Состав газа, свободного от CO ₂	
	1 атм.	10 атм.
CO ₂ %	55,2	35,6
H ₂ %	41,7	42
CH ₄ %	3,1	22,4
Q ккал	3255	4510
Расход O ₂ , м ³ на м ³ газа	0,164	0,124

Как видим, давление в 8—10 атм., вполне осуществимое турбокомпрессором, приводит к значительному повышению содержания метана и теплотворной способности газа. Правда, в газе растёт и содержание углекислоты, в данном случае легко отмываемой. Углекислоту можно использовать в самом процессе газификации для частичной замены водяного пара.

Расход кислорода при газификации под давлением меньше, чем расход его при газификации в обычных условиях. Драве высказывает мысль, что стоимость кислорода вообще будет крайне малой долей в стоимости газа, полученного этим методом.

В настоящем номере помещён реферат интересного доклада председателя английско-го общества коксохимии Эванса о его поездке в Германию для ознакомления с газогенераторами под давлением. Эванс рекомендует английской угольной промышленности освоить этот метод, дающий хороший силовой и бытовой газ, пригодный для дальнего газоснабжения и притом без кокса—обременительного (в Англии) отхода. Подкупает большая гибкость метода: меняя давление дутья, получа-

ли на опытном газогенераторе всю гамму газов — силовой, технологический разного состава, бытовой, высококалорийный промышленный. Следует отметить, что конструктивные детали газогенератора Лурги засекречены фирмой. Питание углем и удаление золы составляют для газификации под давлением весьма нелёгкую задачу, кстати сказать, у нас решенную далеко не совсем удовлетворительно.

Итак, газ в 4500—5000 больших калорий по своей теплотворной способности равен светильному и коксовальному газам, годен для применения в весьма ответственных случаях, например, в мартеновской печи. Дальнейшее транспортирование этого газа экономично, по калорийности он подходит к нормам для бытового газа, содержание окиси углерода может быть приведено к допустимому пределу. Именно этот газ, — типа двойного водяного, даёт наивысшую температуру горения и передача его на дальнейшее расстояние вдвое экономичнее передачи обычного генераторного газа. Если простой генераторный газ имеет теплотворную способность в 1250 ккал/м³, то по грубому расчёту кислород устранением азотного балласта удвоит эту величину до 2500 ккал, швелование доведёт её до 3250 ккал, и наконец, давление обогатит газ метаном с его большой теплотворной способностью по реакциям:



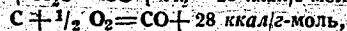
В зависимости от давления, по опытам Драве, содержание метана в газе растёт. Теплотворная способность приближается при 10 атм. к 4500 ккал, а при 20 атм. — к 5000 ккал.

3. Энергетический эквивалент кислородного дутья

Во что энергетически обходится генерация и облагораживание газа при помощи кислорода — без давления и под давлением?

Поставим принципиальный вопрос: какая доля исходного газифицируемого топлива идёт на устранение балластного азота при парокислородном дутье? Собственно эффект кислорода и газификации, если оставить в стороне кинетику процесса, сводится к удвоению концентрации горючих газов путём устранения балластного азота. Азота в газе паровоздушного дутья содержится около 50%.

Определим сначала теоретически необходимое количество кислорода для непрерывной газификации с водяным паром. Возьмём основные реакции:



$$\frac{0,5 \text{ объёма } \text{O}_2}{3 \text{ объёма газа}} = 0,167 \text{ м}^3 \text{ O}_2 \text{ на } 1 \text{ м}^3 \text{ газа, т. е.}$$

около 20%.

Как отмечено, под давлением даст себя чувствовать сильно экзотермическая реакция метанирования окиси углерода; поэтому с повышением давления расход кислорода на газификацию уменьшается (в опытах Драве — для 20 атм. до 0,1 м³ кислорода на 1 м³ газа, калорийностью в 5000 ккал).

Подсчитаем теоретическую работу устранения азота:

$$L = RT \ln \frac{C_1}{C_2}$$

Здесь L — работа концентрирования, T — абсолютная температура, $\ln \frac{C_1}{C_2}$ — натуральный логарифм отношения концентрации горючих компонентов.

Подставляя численные значения, получим

$$a = \frac{2 \cdot 300 \cdot 0,69}{22,4} = 18,5 \text{ ккал/м}^3 \text{ разбавленного газа.}$$

Здесь 0,69 = $\ln 2$, а 22,4 м³ — объём моля. На м³ кислорода получим расход тепла:

$$\frac{18,5 \cdot 0,5}{0,132 \cdot 0,15 \cdot 0,28} = \text{около } 1500 \text{ ккал/м}^3.$$

То же число получаем другим путём: затрата тепла на производство 1 м³ кислорода составит теоретически по той же формуле 0,067 квтч, а практически, приравняв 1 квтч в силовой установке 3000 ккал и приняв кпд кислородной установки равным 15%, получим расход тепла на 1 м³ кислорода

$$\frac{0,067 \cdot 3000}{0,15} = 1500 \text{ ккал/м}^3 \text{ кислорода.}$$

Считая выход богатого газа из 1 кг топлива в 1 м³ (после очистки от углекислоты), а расход кислорода 0,167 м³ на м³ богатого газа, для подмосковного угля, находим долю расходуемой на производство кислорода теплотворной способности исходного твёрдого топлива:

$$\frac{1500 \cdot 0,167}{3250} = 8\%.$$

В среднем, для разных топлив получаем 10%. Пар плюс энергия по стоимости состав-

ляют обычно около 25% от стоимости исходного топлива.

Любопытно отметить, что одни тепловые потери с балластным азотом (устраиваемым при кислородном дутье) составляют по крайней мере 50% от тепловых затрат на производство кислорода.

Мы имеем в виду использование газа, как промышленного топлива. Этой стороне вопроса имеет смысл уделить внимание, так как газу, как промышленному топливу, принадлежит будущее. Газ вытеснит другие виды топлива благодаря лёгкости управления процессом горения, большому коэффициенту полезного действия, лучшему санитарным условиям при сжигании, техническому удобству эксплуатации. Горение газа идёт спокойно и характеризуется постоянством в отношении длины пламени, распределения тепла, расхода кислорода или топлива, скорости распространения пламени.

Возьмём в основу подсчёта приведённые выше цифры: расход кислорода на 1 м³ газа-концентрата равен 0,167 м³. Расход тепла — 1500 ккал/м³ кислорода. Таким образом, расход энергии на парокислородную газификацию 1 м³ большой калорийности составляет 0,167 · 1500 = 250,5 ккал.

Потери с 1 м³ балластного азота:

- | | |
|--|---------|
| a) физическое тепло, уносимое после сгорания газа в дымовую трубу: 0,3-200 | 60 ккал |
| b) потери на повышенное давление дутья и на транспорт азота | 5 ккал |
| v) физическое тепло, теряемое после газогенератора: 0,3-200 | 60 ккал |

Итого . . . 125 ккал

Считая, что на 2 м³ разбавленного газа удаляется балласта — азота — до 1 м³ (уменьшение объёма вдвое), имеем устранение тепловых потерь с азотом при сжигании газа: 125 · 1 = 125 ккал.

Таким образом, одна только экономия на потерях тепла с балластным азотом, по крайней мере, равна половине затрат тепла на производство эквивалентного количества кислорода. В установках академика П. Л. Капицы (см. ниже) энергетический расход на производство 1 м³ кислорода меньше (около 1200 ккал), и указанные потери составляют 65% этого расхода. Это — без учёта повышения пирометрического эффекта при парокислородном дутье, повышения транспортабельности газа, возможности вовлечения в газификацию влажных низкосортных топлив без подогрева дутья и их подсушки, повы-

шения КПД газификации и др. преимуществ парокислородной газификации.

Методика калькуляции этих факторов мало сейчас разработана и должна составить тему отдельной большой работы.

Как легко убедиться из приведённых цифр, всегда выгодно применять даровой, т. е. отбросной кислород (например, азотных заводов) для газификации топлив как для технологических, так и для энергетических и бытовых целей в случае использования газов на месте.

Экономическая приемлемость парокислородного метода газификации при специальном производстве кислорода для дальнего газоснабжения и для потребления на месте должна быть рассмотрена дополнительно с оценкой не только энергетических, но и эксплуатационных расходов, а также и капиталовложений.

4. Топливные ресурсы СССР

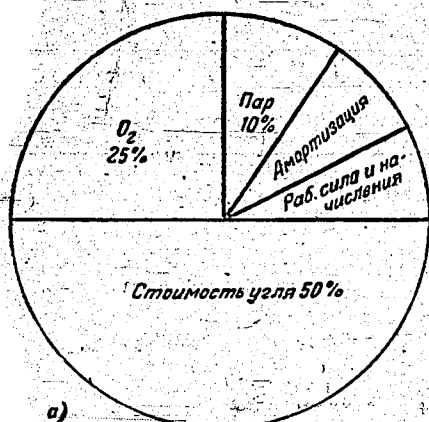
Каково было состояние газификации низкосортных топлив у нас в СССР к концу периода нашего мирного строительства?

СССР — великая лесная, угольная и нефтяная держава. По подсчётам XVII Геологического международного конгресса, наши запасы угля приближаются к грандиозной цифре 1650 млрд. т (второе место в мире, после США), запасы нефти — 7 млрд. т и запасы природного газа — 711 млрд. м³. Около 15% все угольных запасов составляют бурые угли. Размещение основных для топливоснабжения страны угольных и нефтяных районов вызывает необходимость поставить у нас вопрос о переводе таких центров, как Москва и Ленинград, на местное топливо — бурые угли и торф. Однако, это важное мероприятие проводится в жизнь медленно. Так, для 1940 г. картина снабжения Москвы топливом рисовалась в следующем виде (в % от общего количества потреблённого топлива):

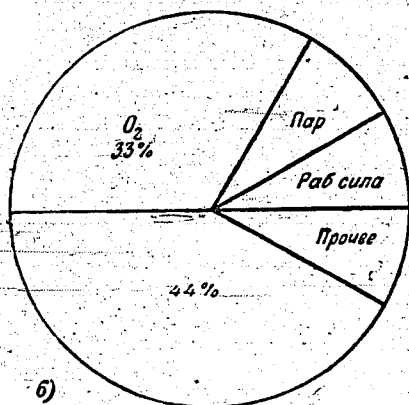
Донецкий уголь	66
Подмосковный уголь	1,1
Нефть	18,5
Торф	0,4
Дрова	14

Любопытно, что запасы торфа в СССР достигают 108 млрд. т, причём прирост составляет ежегодно свыше 50 млн. т. В 1940 г. использовалось лишь 16 млн. т торфа, т. е. меньше трети восстановимого торфяного фонда.

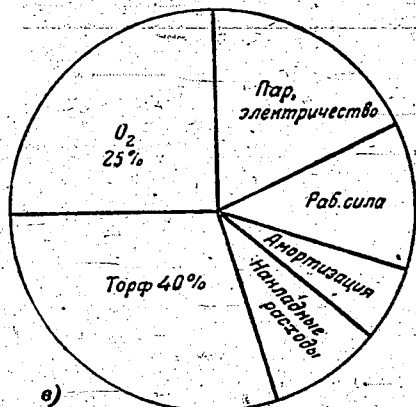
Как видим на примере топливоснабжения Москвы, практически было мало сделано для



а)



б)



в)

Рис. 1. Анализ стоимости газа при парокислородной газификации подмосковного угля и фрезерного торфа: а) газификация подмосковного угля при нормальном давлении, б) газификация фрезерного торфа при нормальном давлении, в) газификация фрезерного торфа под давлением 10 атм.

экономии невозстановимых видов топлива — донецких углей и нефти — в довоенные годы. Главные азототуковые комбинаты — Сталиногорский и Березниковский, — запроектированные с расчётом на местное топливо, работали одну пятилетку за другой на дальнепривозном донецком коксе.

Только в последнее время началась эксплуатация первой нитки дальнего газоснабжения на одном из приволжских месторождений природного газа.

5. Парокислородная газификация в СССР

Значительно большие достижения мы можем отметить в опытных работах лабораторного и полувзаводского масштаба по газификации местных топлив — бурых углей и торфов. В этом номере помещены обстоятельные доклады, освещающие отрядные итоги нескольких длительных опытных работ:

1) газификация (парокислородная) кускового подмосковного и сулюктинского углей в слоевом газогенераторе;

2) газификация мелкозернистых бурых углей (подмосковного, сулюктинского, тквибульского) в «кипящем» слое;

3) газификация фрезерного торфа, торфокрошки и угольной мелочи во взвешенном слое;

4) подземная газификация (кислородная).

В перечисленных экспериментах применялся обогащённый воздух, 30—60% концентрации по кислороду. Эти работы ставили своей целью *чистую* газификацию. Из работ по комплексным проблемам отметим торфодоменную плавку чугунов, прошедшую очень удачно.

Проведённые опыты по чистой парокислородной газификации показали, что газификация на кислороде легко управляется, — даже легче, чем паровоздушная, — что при достаточно сухом угле процесс идёт с большим кпд и с большой форсировкой. Отчётливо намечены типы подходящих газогенераторов и режимы их работы.

Это — вполне оригинальные результаты работ советских исследователей. Они позволили сделать принципиальный анализ стоимости газа из разных топлив. На рис. 1 даны ориентировочные данные для разных наших топлив (для газификации торфа под давлением — предположительные). На рис. 2 показаны соответствующие немецкие данные.

Как видим, для стоимости 1 м³ газа первым определяющим фактором является стоимость топлива, тогда как стоимость кислорода по удельному своему весу стоит на втором и на третьем месте. Именно для газа из бурых углей, кокса, пламенных углей стоимость топлива составляет до 50% стоимости газа, а пара и энергии (включая кислород) — до 30%. Стоимость кислорода в калькуляции газа подземной газификации составляет ещё большую долю. Таковы же, в общем, и итоги немецких работ в части удельной значимости стоимости топлива. На рис. 2 видно, что стоимость отходов для топлив, богатых летучими, почти равна стоимости исходного топлива.

Естественно возникает мысль о широком использовании фрезерного торфа, как самого дешёвого вида топлива (в 2—3 раза дешевле кускового торфа), для обеспечения дешёвым газом тех центров, к которым примыкают большие торфяные массивы (Москва и Ленинград, в первую очередь). Конечно, в процентном отношении доля стоимости кислорода в общей стоимости газа из фрезерного торфа возрастает. Но общая себестоимость газа значительно снижается, уменьшаясь почти

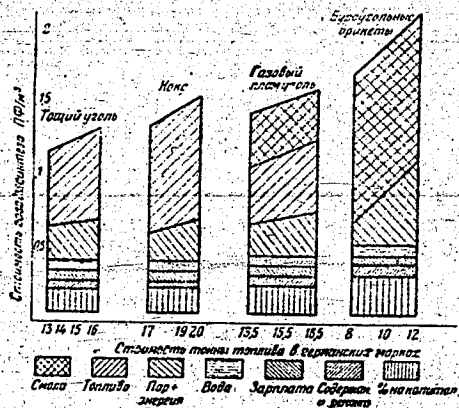


Рис. 2. Стоимость производства газа для синтезов на парокислородном дутье в зависимости от стоимости топлива (по данным книги Н. Brückner «Handbuch der Gasindustrie»).

вдвое против себестоимости газа из углей или кускового торфа, причём форсировка газогенератора возможна в 2—3 раза большая (рис. 3).

К сожалению, работы по изучению безостановочной газификации торфов у нас единичны и крайне недостаточны, а газифика-

ция торфа с применением парокислородного дутья систематически совсем не проводилась. Не было сколько-либо заслуживающих внимания развёрнутых работ также по газификации под давлением — ни кислородной, ни водородной.

Работы по подземной газификации — большое техническое событие — проведены только

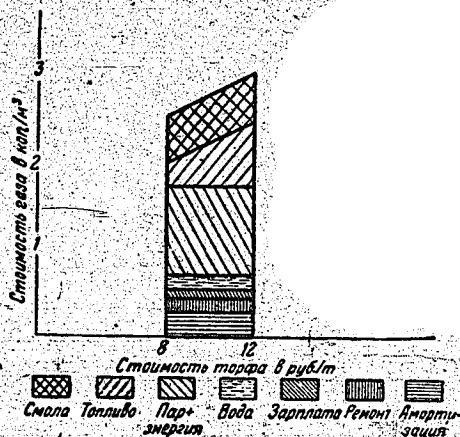


Рис. 3. Диаграмма ориентировочной стоимости газа, полученного путём газификации фрезерного торфа на парокислородном дутье (с учётом стоимости смолы).

в Советском Союзе и притом в весьма солидном масштабе. Однако, процесс этот ещё недоработан до той степени управляемости, которая характерна для наземных станций.

6. Перспективы производства дешёвого кислорода

Приведённые техно-экономические данные показывают, насколько важна для развития газификации низкосортных топлив у нас в стране техническая революция в области производства кислорода. Необходимо удешевление кислорода, укрупнение и упрощение кислородных установок в смысле уменьшения обслуживающего персонала. До сих пор 1 м³ кислорода оценивался в 10 коп., на некоторых станциях — 6 коп. Капиталовложения достигают не менее 1500 руб. на 1 м³, а иногда 1.750 руб. на 1 м³ часовой производительности. В стоимости станции подземной газификации стоимость кислородной установки достигала 75%, а стоимость кислорода — 50% от стоимости газа.

Сейчас ещё не время дать точные цифры для установок Главкислорода (система тур-

бомашин низкого давления (академика П. Л. Капицы), но имеющиеся данные позволяют видеть в этой системе большие преимущества. Стоимость 1 м³ кислорода складывается здесь, примерно, из следующих показателей: электроэнергия — 1,4 коп., амортизация — 0,8 коп., обслуживание — 0,8 коп., т. е. всего около 3 коп. за 1 м³. Капиталовложения при этом не превосходят 500 руб. на м³ часовой производительности. Энергетические компоненты стоимости, надо полагать, ещё более снизятся при использовании в установках низкого давления для привода турбокомпрессоров паровых турбин или газо-

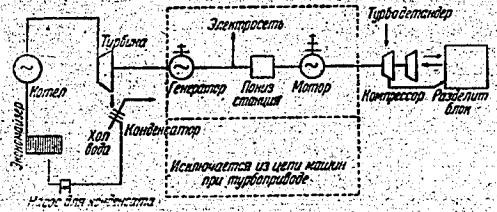


Рис. 4. Схема теплового и холодильного циклов кислородной установки.

моторов вместо электромоторов. Рис. 4 показывает, как сокращается цепь машин при переходе от электропривода турбокомпрессора к паротурбинному приводу и почему возрастает общий кпд установки (котёл — турбина).

Мы имеем:

$$\eta = \eta_{к.у.} \cdot \eta_c^3 \cdot \eta_{п.пр.}^n \cdot \eta_{т.т.} \cdot \eta_{г.} \cdot \eta_{ген.} \cdot \eta_{тр.} \cdot \eta_{пер.} \cdot \eta_{эм.}$$

Здесь $\eta_{общ.}$ — коэффициент (экономический) использования тепла топлива при передаче на вал турбокомпрессора. Значения других коэффициентов следующие:

- $\eta_{к.у.}$ — кпд котельной установки с подогревом питательной воды и воздуха, при максимальной нагрузке около 0,88,
- η_c^3 — коэффициент потребления энергии на собственные нужды станции $\approx 0,98$,
- η_c^n — коэффициент потребления пара на собственные нужды станции $\approx 0,98$,
- $\eta_{п.пр.}$ — коэффициент полезного действия паропровода, учитывающий потери пара в соединениях, тепловые потери трубопроводом и системой регенеративного подогрева питающей воды $\approx 0,95$,
- $\eta_{т.т.}$ — термический кпд (отношение тепла, превращённого в работу в турбине при адиабатическом перепаде, к теп-

- лу, сообщённому котельной установке),
- $\eta_{т.}$ — внутренний относительный кпд турбины: отношение действительной работы на валу турбины к работе адиабатического расширения пара; $\eta_{т.} \approx 0,375$ для $p = 120$ атм. (в котле),
- $\eta_{г.}$ — кпд турбины $\approx 0,95$,
- $\eta_{ген.}$ — кпд генератора $\approx 0,95$,
- $\eta_{тр.}$ — кпд трансформатора понизительной станции,
- $\eta_{пер.}$ — кпд электропередачи; $\eta_{тр.} \cdot \eta_{пер.} \approx 0,85$,
- $\eta_{эм.}$ — кпд электромотора $\approx 0,92$.

Следовательно:

$$\eta_{общ.} = 0,88 \cdot 0,98 \cdot 0,98 \cdot 0,95 \cdot 0,95 \cdot 0,375 \cdot [0,95 \cdot 0,85 \cdot 0,92] = 0,211$$

Таким образом, повышение кпд агрегата составит при переходе от электропровода к паротурбинному:

$$\frac{0,276 - 0,211}{0,211} \approx 28\%$$

Здесь 0,276 — произведение первых семи коэффициентов (без коэффициентов электрических машин) = $0,88 \cdot 0,98 \cdot 0,98 \cdot 0,95 \cdot 0,95 \cdot 0,375$.

Принимая во внимание отдачу энергии в турбодетандере и его большой кпд в схеме академика Капицы, мы можем ожидать затрату тепла в новых установках на 1 м³ кислорода в два раза меньшую по сравнению с прежними установками.

Легко уяснить себе всю народнохозяйственную важность такой экономизации кислородной техники, если представить себе грандиозный масштаб самого спроса на кислород со стороны, например, одной только газовой промышленности.

Некоторое представление о потребности нашего народного хозяйства в кислороде для газификации может дать хотя бы следующий примерный подсчёт баланса азота.

Ежегодный унос азота из почвы зерновыми и огородными культурами в последние годы составлял около 5 млн. т, возврат — 1,5 млн. т, дефицит — 3,5 млн. т. Возврат азота осуществляется за счёт: навоза — 1 млн. т, бобовых культур — 0,2 млн. т, торфа — 0,1 млн. т, промышленных удобрений — 0,2 млн. т. Для того, чтобы довести возврат азота промышленными удобрениями до 20% (1 млн. т) и снизить дефицит до 2,7 млн. т, надо заготовить в год по крайней мере 1 млн. т аммиака, что соответствует $10^6 \cdot 4 \cdot 000 = 4 \cdot 10^9$ м³ азотноводородной смеси. Если только одна треть этого количества бу-

дет изготовлена из бурого угля, то потребность в кислороде выразится цифрой 100 000 м³/час.

7. Заключение

В итоге этого мы можем сегодня констатировать, что:

1) Парокислородная газификация бурых подмосковных и др. углей в кусках, в пыли и в «кипящем» слое освоена в большом масштабе; подготовлено проектирование промышленных установок, на которых и будет произведена окончательная доводка процесса до оптимума и решён ряд сопутствующих вопросов (отделение от колчедана, отмывка от углекислоты, использование отходов, конструктивные детали газогенераторов).

2) В таком же состоянии находится освоение процесса газификации фрезерного торфа во взвешенном состоянии.

3) Процесс парокислородной газификации углей и торфов (крошки и фрезерного) под давлением представляется имеющим весьма большие перспективы в наших условиях. За изучение его и разработку конструктивного оформления следует приниматься незамедлительно.

4) Должны быть очерчены геологические и технические условия применимости подземной газификации и освоены методы управления ею.

5) Применявшийся в опытах кислород ложился тяжёлым бременем на стоимость продукта — газа. Создание советской системы кислородных установок большого масштаба и малого давления (на турбомашинках академика П. Л. Капицы) открывает долгожданные новые перспективы для кислородной газификации низкосортных топлив.

ОБСУЖДЕНИЕ

Акад. П. Л. Капица: Данные, приведённые проф. К. Ф. Павловым, показывают, что до 10% топливных ресурсов США используется в виде газа. Этот газ, вообще говоря, можно получать различными путями. Нас интересуют методы получения горючих газов на парокислородном дутье.

Надо отметить, что экономическая сторона какого-либо процесса не всегда является решающей. Под Москвой, например, имеются огромные запасы торфа. Используя их для газификации, мы можем быть в первое время получим газ несколько более дорогой, чем из угля, но зато мы сможем сократить по-

требность в донецком угле. В ряде случаев газификация бурого угля и торфа вначале будет несколько дороже, чем при последующем развитии. Так почти всегда бывает во всяком новом деле. Поэтому при оценке рентабельности газификации местных топлив надо учесть возможности развития техники.

Нужно решить, как правильнее использовать наши топливные ресурсы. Может быть вместо газификации торфа на парокислородном дутье, например, выгоднее сжигать торф на месте добычи в котельных электростанций и передавать в города электроэнергию, как это делается сейчас.

Снабжение крупных городов не углём, а газом — весьма привлекательная задача. Можно будет избавиться от дыма и грязи, неизбежных при сжигании угля. Однако, с другой стороны, газификация возможно приведёт к увеличению несчастных случаев, вызванных отравлением газом. Все эти и многие другие вопросы нужно поставить и дать на них ответ. Экономические факторы всегда можно учесть и скалькулировать, но желательнее нарисовать полную картину возможностей использования газа и роль, которую должен при этом сыграть кислород.

Проф. А. Б. Чернышёв: Применение кислородного дутья в газовой промышленности мыслится, прежде всего, для производства генераторных газов. Эти газы делятся на три категории: а) собственно генераторные газы, получаемые на воздушном и паровоздушном дутье с теплотворной способностью до 1500 ккал, б) водяной газ, необходимый для химической технологии, и в) газ для городского газоснабжения. Кислород нужно применять в первую очередь для производства газов второй и третьей категорий и, главным образом, для производства водяного газа. Именно здесь можно значительно удешевить производство за счёт отказа от периодического процесса и перехода на непрерывный способ получения водяного газа. Это резко сократит начальные капиталовложения и упростит управление процессом.

Итак, основным потребителем кислорода является производство водяного газа. Водяной газ находит весьма широкое применение в промышленности. Он является одним из основных источников для получения водорода. В Германии, например, перед войной из водяного газа получалось по крайней мере 3 млрд. м³ водорода в год. В США производство водорода на базе водяного газа превысило 10 млрд. м³ в год.

Как известно, водород широко применяется для различных синтезов: синтеза аммиака, жидкого топлива и др. Эти области применения водорода имеют весьма широкие перспективы. Выход синтетического жидкого топлива из 1 м³ водяного газа составляет примерно 100—120 г. Для производства 1 млн. т жидкого топлива потребуется, таким образом, около 10 млрд. м³ водяного газа. Вот какими колоссальными цифрами характеризуется это производство.

Здесь упоминалось о применении водяного газа для городского газоснабжения. Конечно, в какой-то мере водяной газ будет применяться и для этой цели. Московский газовый завод вырабатывает, например, именно водяной газ и смешивает его с отходящими газами, получающимися при крекинге нефти. Смесь этих газов идёт в городскую сеть. Но для решения задачи городского газоснабжения есть и другие источники. Одним из таких источников является коксовый газ. В районах, где имеются коксовые установки, этот газ будет значительно дешевле, чем водяной газ. Вторым источником служат природные газы. По масштабу добычи их мы значительно отстали от Америки; однако, по запасам природного газа СССР не менее богат, чем США. Перспективы развития добычи природных газов в нашей стране огромны. Этот газ дешевле всех остальных горючих газов, для его добычи достаточно оборудовать простую скважину. Там, где этот газ может быть использован, он будет вне всякой конкуренции. Однако, природные газы имеются далеко не везде. Учитывая огромные пространства нашей страны и наличие значительных запасов местных топлив, надо думать, что мы будем применять горючие газы, полученные из твёрдого топлива, в достаточно больших масштабах.

Одним из наиболее богатых перспективами путей решения задачи промышленного газоснабжения является производство газа в доменной печи на дутье, обогащённом кислородом. В этом случае процесс газификации сочетается с металлургическим процессом выплавки чугуна, а также с рядом химических процессов, таких, как получение карбида кальция, цемента и т. д. Таким образом на дутье, обогащённом кислородом, может быть организовано комплексное производство, а это значительно снизит капиталовложения и другие расходы. Для газоснабжения крупных городов нужны агрегаты огромной мощности. В этом отношении преимущества на стороне

доменных печей, которые во много раз превосходят по мощности другие типы генераторов.

В течение ряда лет изучались различные способы газификации и, в частности, газификации под давлением. Однако, последняя задача до сих пор в окончательном виде ещё не решена, главным образом вследствие конструктивных трудностей.

Мне кажется, что целесообразно в первую очередь заняться изучением применения кислорода для производства водяного газа в агрегатах трёх основных типов: в плотном слое, под давлением и во взвешенном слое. Эти три типа агрегатов нужно детально рассмотреть с точки зрения энергетических и материальных затрат на их осуществление. Следует отметить, что при газификации во взвешенном слое коэффициент полезного действия процесса составляет примерно 75%; кроме того, в этом процессе можно использовать мелкозернистые виды топлив. На кусковом топливе в плотном слое КПД составляет около 80%. При газификаций под давлением КПД повышается до 93%; однако, как уже отмечалось, осуществление этого последнего способа встречает большие конструктивные трудности. Каждый из указанных методов производства газа имеет свои достоинства и недостатки, которые необходимо детально рассмотреть и взвесить.

Инж. Г. Н. Полубояринов: Я принимал участие в первых работах по промышленному освоению газификации кускового топлива на кислородном дутье, проведённых в Горловке. Опыты показали, что этот процесс можно сваявать и в промышленном масштабе.

Парокислородная газификация кускового топлива — один из экономичных способов его переработки, прежде всего с точки зрения КПД установки. Однако, парокислородное дутье не может быть рекомендовано, как универсальное средство газификации кускового топлива. Газ, получаемый в этом процессе, не вполне удобен для технологических целей и требует сложных методов подготовки.

При газификации подмосковных углей можно отказаться от старых способов, при которых мы старались сбечь смолу. Опыты переработки смолы из подмосковных углей показали, что она не представляет собой большой ценности, несмотря на наличие в ней фенолов. При переводе газификации на кислородное дутье на любом топливе, осо-

бенно на угле и торфе, мы встретимся с очень неблагоприятным явлением с точки зрения выхода смолы. Для отделения смолы в верхней части газогенератора, работающего на кислороде, нехватает тепла. Часть смол в результате этого попадает в зону газификации и гибнет. Разрабатывая способы использования основных местных топлив с применением кислорода, надо иметь в виду, что выход смолы будет несколько меньшим. При газификации торфа с этим можно не особенно считаться, так как смолы торфа малоценны. Необходимо также развернуть опытные работы по газификации местных топлив.

Прежде всего следует установить опытные генераторы для газификации на кислородном дутье в «кипящем» слое, с целью получения технологического или энергетического газа. Затем большой интерес будет представлять газификация фрезерного торфа и мелочи подмосковных углей под давлением. Что касается метода газификации кускового топлива, то можно было бы говорить уже о внедрении его в промышленность, так как дополнительных опытов для изучения его не требуется. Все неясные еще вопросы можно будет уточнить в процессе эксплуатации первой установки.

ГАЗИФИКАЦИЯ МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ УГЛЕЙ В «КИПЯЩЕМ» СЛОЕ НА ПАРОКИСЛОРОДНОМ ДУТЬЕ *)

Инж. Н. В. КАРХОВ

Инженер Николай Васильевич Кархов — специалист в области газификации твердых топлив. Он разработал новую конструкцию генератора для газификации мелкозернистых углей в «кипящем» слое. Это будет первый советский газогенератор непрерывного действия, работающий на кислородном дутье. В ближайшее время этот газогенератор будет пущен в эксплуатацию на одном из химических заводов.

Основные явления газификации мелкозернистого топлива в так называемом «кипящем» слое впервые наблюдались в 1921 г. Ф. Винклером в Германии. Разработанный затем на этом принципе газогенератор стал известен под названием генератора Винклера.

Способ газификации по Винклеру состоит в том, что газовый поток пропускается в газогенераторе снизу вверх через слой мелкозернистого топлива. При этом топливо приходит в интенсивное движение, напоминая кипение жидкости. Отсюда и возникло название — газификация в «кипящем» слое.

Как сообщил Гримм [1] в 1931 г. на Питсбургской конференции по битуминозным углям, концерн И. Г. Фарбениндустри, владеющий патентами по газогенератору Винклера, осуществил в период 1922—1931 гг. большие исследовательские работы, завершившиеся строительством на заводах в Оплау и

Лейна опытных и промышленных газогенераторов значительной мощности.

Вначале газогенераторы Винклера предназначались для производства силового газа для газомоторов, а также водяного газа при периодическом процессе, т. е. только на обычном паровоздушном дутье. Исходным топливом служил буроугольный кокс и германский бурый уголь.

Совершенствование способов производства кислорода, вызвавшее значительное его удешевление, послужило стимулом к применению в газогенераторах Винклера кислородного дутья. Применение кислорода позволило осуществить непрерывность процесса производства технологического газа, пригодного для синтеза аммиака и других химических продуктов.

По сообщению Бота [2] применение кислорода сделало метод газификации в «кипящем» слое наиболее совершенным и уже в 1931 г. на заводе в Лейна работали на кислородном дутье газогенераторы производитель-

*) Доклад на заседании Технического совета Главкислорода при СНК СССР 12 октября 1943 г.