

КИСЛОРОД

БЮЛЕТЕНЬ

ТЕХНИЧЕСКОГО СОВЕТА ГЛАВКИСЛОРОДА
ПРИ СНК СССР

№ 3

1944

С ЗАСЕДАНИЙ ТЕХНИЧЕСКОГО СОВЕТА

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ КИСЛОРОДНОГО ДУТЬЯ В ЭНЕРГЕТИКЕ*)

Акад. Б. Е. ВЕДЕНЕВ

Весьма распространённые в технике процессы, связанные с горением топлива, требуют огромного количества кислорода. До настоящего времени основным источником кислорода для всех этих процессов является атмосферный воздух. Однако, наличие в воздухе больших масс инертного газа — азота — связано с целым рядом неудобств в использовании кислорода и приводит к бесполезным затратам энергии. Так, например, подача воздуха в аппараты требует большого расхода энергии, из которой не более $\frac{1}{5}$ используется для процесса. Наличие в воздухе инертного азота приводит к увеличению размеров аппаратов и газо-воздухопроводов. Кроме того, работа на обычном воздухе, по сравнению с работой на кислороде, связана с значительным (до 5 раз) увеличением потерь с уходящими газами. Содержание в воздухе балластного азота вызывает также резкое снижение температурного потенциала процесса по сравнению с работой на чистом кислороде. Это особенно важно в тех процессах, которые требуют высоких температур. Такими процессами являются металлургические процессы и многие другие. В ряде случаев для повышения температурного уровня процесса приходится идти на подогрев воздуха, соответствен-

но усложняя аппаратуру и удорожая производство. Из сказанного становится ясным, что во многих процессах замена атмосферного воздуха чистым кислородом или дутьём, обогащённым кислородом, весьма желательна.

Основными препятствиями, которые до настоящего времени существовали на пути широкого внедрения кислорода в технику, являлись высокая его стоимость, а также громоздкость и малая производительность кислородных машин. Однако, даже несмотря на эти неблагоприятные факторы, применение кислорода в некоторых процессах сулило настолько большие выгоды, что вопрос о его промышленном использовании был поставлен ещё 10—15 лет назад. В то время были произведены предварительные технико-экономические подсчёты и начаты опытные работы, которые проводились иногда (например, в доменном деле) на довольно крупных установках.

Эти работы показали, что даже, несмотря на высокую стоимость кислорода, его применение в ряде процессов оказывается экономически целесообразным. Кислород позволяет интенсифицировать процессы, увеличить мощность агрегатов, а иногда, как, например, при газификации топлив, резко повышает качество получаемого продукта. Известен успешный опыт работы доменных печей на Чернореченском химкомбинате и на Днепропетровском заводе металлургического оборудования

*) Доклад на заседании Технического совета Главкислорода при СНК СССР 25 апреля 1944 г.

(ДЗМО). Однако, недостаточная мощность кислородных машин продолжала оставаться весьма сильным препятствием на пути внедрения кислорода.

Новый способ получения кислорода из воздуха, разработанный акад. П. Л. Капицей, позволяет снизить расходы энергии, а главное даёт возможность получить кислородные агрегаты большой производительности, в десятки раз превышающие производительность установок старого типа. Это совершенно по-новому ставит вопрос о применении кислорода в технике и заставляет снова подвергнуть тщательному анализу весь комплекс связанных с этим проблем. Можно с полной уверенностью утверждать, что применение нового способа получения кислорода значительно расширит круг возможных его потребителей.

Среди различных отраслей промышленности энергетика является одним из крупнейших потребителей топлива, а следовательно, и кислорода. Достаточно сказать, что на каждый киловаттчас электроэнергии, выработанной на тепловых электростанциях, расходуется около $0,8 \text{ м}^3$ кислорода. Поэтому применение в энергетике кислорода или обогащённого им воздуха является вопросом весьма большой важности.

Рассматривая перспективы применения кислорода в энергетике, в первую очередь необходимо изучить вопрос о целесообразности его использования в котельных установках как существующего типа, так и новых, специально предназначенных для работы на кислородном дутье. Второй областью энергетики, где возможно применение кислорода, являются двигатели внутреннего сгорания, в частности, газовые турбины. Наконец, нужно детально проанализировать возможность осуществления комбинированных энерго-технологических процессов. Этот последний путь применения кислорода несколько выходит за рамки чистой энергетики и должен рассматриваться скорее технологами, а не энергетиками или, во всяком случае, теми и другими вместе.

Использование кислорода или обогащённого им воздуха в котельных установках вызовет следующие изменения характеристики этих установок:

1. Сократятся потери тепла с уходящими газами за счёт уменьшения балластных объёмов азота, снижения коэффициента избытка воздуха в топке, а также уменьшения присосов в установке в связи с меньшими её размерами.

2. Благодаря интенсификации горения и повышению температуры процесса снизятся потери тепла от механического и химического недожога топлива.

3. Сократятся потери тепла в окружающую среду за счёт уменьшения размеров установки.

4. Снизится расход энергии на тягу и дутье за счёт сокращения объёмов газов и воздушной смеси, обогащённой кислородом.

5. Уменьшатся расходы энергии на подготовку в связи с значительной интенсификацией процесса горения, что позволит удовлетвориться более грубым помолом.

6. Резко повысится начальный температурный уровень процесса, в связи с чем возрастёт интенсивность излучения и сократятся относительные размеры радиационных поверхностей нагрева.

7. Уменьшится объём топки, так как при повышении концентрации кислорода резко сократится объём топочных газов.

8. Значительно уменьшатся размеры конвективных поверхностей нагрева благодаря уменьшению относительных объёмов газов.

9. Появится необходимость в сооружении мощной кислородной установки, требующей значительных капиталовложений.

10. Возникнет дополнительный расход энергии на получение кислорода.

Таким образом, применение кислородного дутья приведёт к повышению экономичности самого котельного агрегата и к уменьшению его размеров, веса, а значит, и стоимости. Однако, экономии в капиталовложениях и эксплуатационных расходах по котельному агрегату противостоят дополнительные капиталовложения на сооружение кислородной установки и эксплуатационные расходы, связанные с получением кислорода. Вопрос о целесообразности применения кислорода можно решить только сравнением обеих этих показателей.

Многие из указанных выше изменений в характеристике работы котельного агрегата не поддаются непосредственному расчёту и могут быть определены только экспериментально. Так, например, нельзя предварительным расчётом определить снижение потерь от химического и механического недожога или сокращение расхода энергии на размол топлива в зависимости от увеличения концентрации кислорода в дутье.

В случае применения обогащённого дутья в котельных установках, работающих на электростанциях, можно говорить лишь о небольших степенях обогащения воздуха кислоро-

дом, в пределах до 30—35%. При этом, как будет показано ниже, ещё не потребуется сколько-нибудь существенных переделок агрегата. Для примера рассмотрим перевод на кислородное дутьё котельного агрегата производительностью 150 т пара в час, работающего на пыли антрацитового штыба. Основными расчётными степенями обогащения воздуха кислородом приняты по объёму: 21 (обычный воздух), 25, 30, 35%. Более высокие степени обогащения дутья для существующих установок, как уже указывалось, нежелательны, так как они будут связаны с значительным объёмом их реконструкции. Однако, расчётные характеристики были определены и для больших степеней обогащения дутья кислородом, вплоть до работы на чистом кислороде, с тем, чтобы одновременно выяснить и характеристики котельного агрегата специализированного типа, заранее предназначенного для работы на кислороде.

Исходные данные, принятые при расчёте, представлены в табл. 1. Расход электроэнер-

Таблица 1

Исходные расчётные данные для определения характеристики котельных агрегатов, работающих на кислородном дутье

Наименование величин	Атмосферный воздух	Чистый кислород
Коэффициент избытка воздуха в топке	1,25	1,05
Коэффициент избытка воздуха за установкой	1,45	1,05
Температура уходящих газов (в °Ц)	180	180
Температура подогрева воздуха (в °Ц)	300	300
Расход энергии на размол топлива в кот-ч на тонну	30	5

гии на размол топлива, в случае работы котельной установки на чистом кислороде, принят в предположении, что допустимое угрубление помола позволяет повысить производительность мельниц примерно в 6 раз.

Следует остановиться особо на изменении величины потерь от химического и механического недожога. Эти потери, в зависимости от содержания кислорода в дутье, могут быть определены только экспериментально. Однако, есть некоторые основания ожидать весьма резкого их снижения с повышением концентрации кислорода. Повышение концентрации

кислорода в дутье так же влияет на температурный уровень процесса, как и определённое повышение температуры подогрева воздуха. Увеличение содержания кислорода с 21 до 25%, например, эквивалентно повышению подогрева воздуха с 300 до 600° Ц. Можно думать, что при подогреве воздуха до 600° Ц механический недожог почти не будет иметь места. Поэтому в дальнейшем, при концентрации кислорода в 25% и выше, потери на недожог принимаются равными нулю.

На рис. 1 графически представлены изменения исходных расчётных величин в зависи-

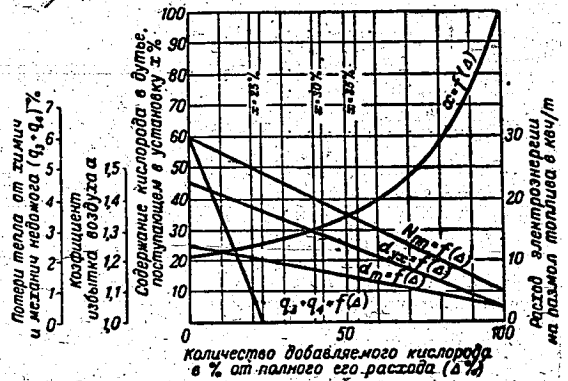


Рис. 1. Зависимость исходных расчётных величин от количества кислорода, добавляемого к воздуху.

мости от количества добавляемого к воздуху кислорода. Все остальные характеристики работы агрегата могут быть установлены непосредственным расчётом.

При определении оптимальной концентрации кислорода в дутье для существующих котельных установок основным требованием являлось наличие минимума переделок самих установок. Из этих соображений были приняты: постоянный расход газов через конвективную часть котла, равный 173-500 м³/час, и постоянная температура газов на выходе из топки, равная 1275° Ц. При соблюдении указанных условий работа конвективной части установок остаётся практически неизменной, независимо от концентрации кислорода; не меняется и дымососная установка. При постоянном времени горения частицы угля (а при повышении концентрации кислорода оно, вероятно, даже несколько сократится) и постоянном расходе газов необходимый объём топочной камеры также можно оставить неизменным. В результате всего этого можно сохранить все размеры котельного агрегата:

Таблица 2

Характеристика реального котельного агрегата, работающего на обычном воздушном дутье (21%) и на дутье, обогащённом кислородом

Наименование	Содержание кислорода (в %) в дутье			
	21	25	30	35
I. Характеристики топки				
Теоретическая температура горения (в °Ц)	1890	2090	2280	2420
Температура в конце топки (в °Ц)	1275	1275	1275	1275
Степень экранирования	0,6	1,0	1,0	1,0
Эффективная поверхность экранов (в м²)	291	512	664	773
Количество двухцветных экранов	—	—	—	—
II. Экономичность агрегата (брутто)				
Потеря тепла с уходящими газами (в %)	7,93	7,13	5,76	4,75
Потеря тепла от химического и механического недожога (в %)	8,45	0	0	0
Потеря тепла в окружающую среду (в %)	6,0	0	0	0
Сумма потерь (в %)	1,0	0,85	0,65	0,50
Кпд агрегата (брутто) (в %)	14,93	7,98	6,41	5,25
	9,45			
	85,07	92,02	93,59	94,75
	90,55			
III. Расход кислорода, топлива и паропроизводительность (брутто)				
Процент добавки кислорода	0	23	42	53
Количество добавляемого кислорода на 1 кг топлива (в м³/кг)	0	0,343	0,619	0,790
Полное количество добавочного кислорода (в м³/час)	0	7,05·10³	16,07·10³	25,45·10³
Удельный объём газа на 1 кг топлива (в м³/кг)	10,1	8,44	6,69	5,39
Часовой расход топлива (в кг/час)	18,25·10³	20,58·10³	25,94·10³	32,20·10³
Паропроизводительность (брутто) (в кг/час)	17,14·10³			
	150·10³	182,5·10³	234,2·10³	294,5·10³
IV. Экономичность и паропроизводительность (нетто)				
Расход энергии на тягу (в кВт·ч)	350	350	350	350
Расход энергии на дутьё (в кВт·ч)	200	156	130	109
Удельный расход энергии на разлом (в кВт·ч/т)	30	24	20	17

Продолжение табл. 2

Наименование	Содержание кислорода (в %) в дутье			
	21	25	30	35
Полный расход энергии на разлом (в кВт·ч)	547			
Расход энергии на получение кислорода (в кВт·ч)	513	493	520	547
Полный суммарный расход энергии на собственные нужды (в кВт·ч)	0	2130	4820	7630
Паропроизводительность (нетто) (в кг/час)	1097			
	1063	3129	5820	8636
Удельный расход топлива (в кг/кг)	145,06·10³	168,42·10³	208,0·10³	255,6·10³
Экономия топлива (в %)	145,21·10³	0,1222	0,1247	0,1258
	0,1180			
	0	2,86	0,87	0

его каркас, обшивку, обмуровку, все основные узлы, дымососную систему и т. д.

При повышении концентрации кислорода падает удельный объём продуктов горения на 1 кг топлива, поэтому постоянному суммарному расходу газов соответствуют различные расходы топлива, а следовательно, и различная паропроизводительность установок.

В табл. 2 приведены результаты расчёта работы того же котельного агрегата на дутье с различной степенью обогащения кислородом. В первом столбце в знаменателе даны значения соответствующих величин, полученные без учёта влияния потерь от химического и механического недожога топлива. Эти значения представляют интерес для пламенных топлив, при сжигании которых и на обычном воздухе практически отсутствуют потери от механического и химического недожога.

На рис. 2, 3 и 4 представлены основные характеристики того же агрегата в зависимости от содержания кислорода в дутье. Пунктирными линиями показаны значения, полученные без учёта влияния потерь от химического и механического недожога.

При подсчете экономичности агрегата (нетто) принималось, что расход энергии на получение кислорода составляет 0,3 кВт·ч на кубометр, а расход пара — 4,5 кг на 1 кВт·ч.

Как видно из приведённых данных, отсутствие потерь на химическую и механическую неполноту сгорания при всех указанных концентрациях кислорода в дутье связано с не

перерасходом топлива. По мере повышения добавки кислорода этот перерасход возрастает. Для топлив, сжигаемых с высоким механическим недожогом, некоторую экономию мож-

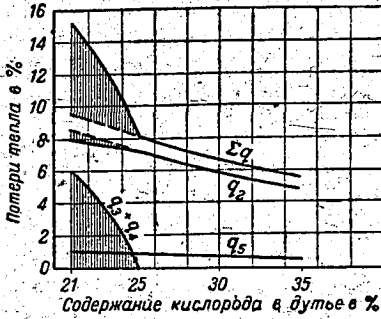


Рис. 2. Потери в котельном агрегате в зависимости от содержания кислорода в дутье (Σq — сумма потерь, q_g — потери с отходящими газами, $q_a + q_c$ — потери от химического и механического недожога, q_s — потери на излучение).

но получить и при малых степенях обогащения дутья кислородом. Однако, следует заметить, что исходное положение о резком снижении этого недожога должно быть проверено экспериментально.

Не давая существенной экономии в расходе топлива, а для пламенных топлив вызы-

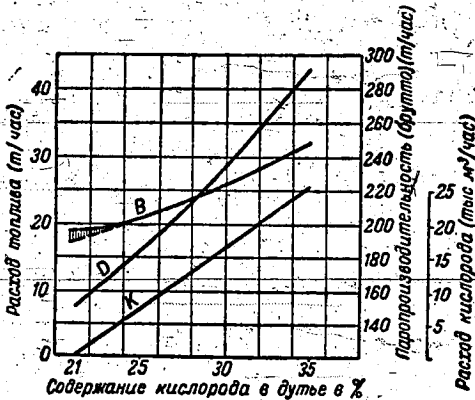


Рис. 3. Расход топлива, паропроизводительность и расход кислорода котельной установки в зависимости от содержания кислорода в дутье (B — расход топлива, D — паропроизводительность, K — расход кислорода).

вая даже его перерасход, обогащение дутья кислородом позволяет весьма значительно повысить мощность агрегата без сколько-нибудь существенных его переделок. Поэтому

для окончательного суждения о целесообразности применения кислорода в существующих котельных установках необходимо дать анализ изменения капиталовложений по сравнению с работой на обычном дутье. Этот анализ приведен в табл. 3 (стр. 6). Стоимость котла производительностью 150 т пара в час принята равной 1,5 млн. руб., а стоимость кислородной установки производительностью 10 000 м³/час вместе с приводом и зданием — равной 5 млн. руб.

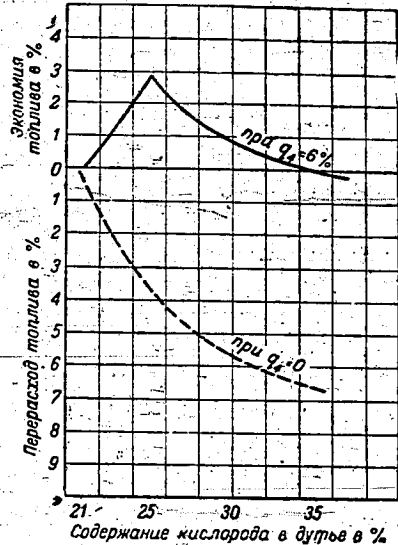


Рис. 4. Экономичность котельного агрегата в зависимости от содержания кислорода в дутье (q_g — потери от механического недожога).

Как видно из табл. 3, уже сравнительно малые степени обогащения дутья кислородом приводят к значительному росту капиталовложений, окупаемость которых растягивается на длительные сроки. Таким образом, применение кислорода в котельных установках существующих типов может быть оправдано лишь для низкосортных топлив типа АШ (антрацитового штыба) с высокими потерями от механического недожога. При этом допустима лишь сравнительно малая степень обогащения дутья кислородом. Правда, применение кислорода в котельных установках даёт некоторые дополнительные выгоды, которые трудно учесть расчётом. К ним относятся: повышение устойчивости горения, облегчение условий растопки, возможности установки муфельных горелок и пр.

Следует указать, что приведённые выше расчёты относятся к значению потерь на механический недожог, равному 6%. Однако, в практике часто встречаются и более высокие значения этих потерь, доходящие до 12—15%. В этом случае экономия, получаемая в результате применения кислородного дутья,

Таблица 3

Капиталовложения при переводе котельной установки на кислородное дутьё в зависимости от содержания кислорода в дутьё

Наименование	Содержание кислорода (в %) в дутьё			
	21	25	30	35
Стоимость котельной установки на 1 т пара (в руб.)	10330	8020	7210	5870
Стоимость кислородной установки на 1 т пара (в руб.)	—	20900	38700	49800
Перерасход на 1 т производительности (в руб.)	—	9490	35580	45340
Экономия топлива на 1 т производительности (в кг)	—	3,6	1,1	—
Годовая экономия топлива при 6000 час. использования (в т)	—	21,6	6,6	—
Годовая экономия при стоимости топлива 35 руб. за 1 т (в руб.)	—	760	230	—
Число лет окупаемости дополнительных капиталовложений	—	12,5	15,5	—

будет значительно большей. Более высокой будет и оптимальная степень обогащения воздуха кислородом.

Топлива типа АШ занимают в энергетическом балансе нашей страны весьма значительное место и, как правило, сжигаются с высоким механическим недожогом. Применение кислорода в установках, работающих на этих топливах, может дать весьма значительный экономический эффект. Поэтому экспериментальная проверка возможности снижения механического недожога путём обогащения дутья кислородом является одной из первоочередных задач.

В свете изложенного становится ясным, что применение высоких степеней обогащения дутья кислородом на специально спроектированных установках не даст значительного повышения экономичности процесса. Некоторый интерес представляют лишь конструктив-

ные данные котла. Они могут быть подсчитаны так же, как это делалось для агрегата существующей конструкции. Правда, в этом случае результаты расчётов удобнее относить к установке постоянной производительности. Ориентировочный расчёт котельного агрегата производительностью 150 т пара в час приве-

Таблица 4

Результаты расчёта работы котельного агрегата производительностью 150 т пара в час на кислородном дутьё

Наименование	Содержание кислорода (в %) в дутьё			
	21	30	60	100
Теоретическая температура горения (в °C)	1890	2280	2875	3300
Объём топочной камеры (в м³)	800	560	235	150
Сокращение объёма топки (в %)	100	70	29,5	18,7
Эффективная поверхность экранов (в м²)	291	465	390	339
Изменение поверхности экранов (в %)	100	163	134	117
Размеры конвективной поверхности нагрева (в м²)	1500	1050	442	290
Изменение размеров конвективной поверхности (в %)	100	70	29,5	18,7
Ориентировочное сокращение веса агрегата (в %)	100	80	50	36

ден в табл. 4. Величины эффективных поверхностей экранов определены для случая работы на обычном дутьё (21% O₂) с учётом применения шамотного пояса, а в остальных случаях — без него.

Данные, приведённые в табл. 4, являются весьма ориентировочными. Однако, они показывают, что при высоких степенях обогащения можно рассчитывать на чрезвычайно резкое снижение размеров и веса котельного агрегата. Это может представлять определённый интерес для установок специального назначения, в которых вопросы экономичности часто играют подчинённую роль.

Остановимся на возможности применения кислорода в газовых турбинах. Для повышения температурного уровня и интенсификации процесса применение кислорода в этом случае не даст положительного эффекта. Однако, может иметь место снижение расхо-

да энергии на сжатие воздуха. Это очень важно, так как даже в наиболее разработанном типе турбин постоянного давления на сжатие воздуха тратится до 75—80% всей энергии, вырабатываемой турбиной.

В газовой турбине температура в камере сгорания и при входе на лопатки ограничена 550—600° Ц, так как металл при отсутствии специального охлаждения не выдерживает более высокой температуры. Значит, даже при работе на обычном дутье в камеру сгорания приходится давать очень большой избыток воздуха, чтобы не превышать этот температурный предел. Применение кислорода в газовой турбине уменьшит количество вдуваемой воздушной смеси, необходимой для горения. Однако, в камеру сгорания придется подавать большее количество балластного воздуха под тем же давлением.

Коэффициент полезного действия газовой турбины пока что очень низок — от 18 до 24%. Повышение температурного уровня в топочной камере может значительно увеличить экономичность турбины. Повидимому, в этом направлении и будет развиваться техника газовых турбин. Применение же обогащенного кислородом воздуха вместо нормального вряд ли даст в этом отношении что-либо существенное.

Более заманчивой является проблема применения для той же турбины жидкого кислорода. При этом в качестве балласта для снижения температуры в турбине может быть использована вода, превращающаяся в топочной камере в пар. Подача топлива, воды и кислорода может осуществляться небольшими насосами. Таким образом, вся установка может работать вообще без компрессора. Это позволит сильно повысить давление в камере сгорания, которое при компрессорной подаче воздуха невыгодно поднимать выше 3—4 ат.

Как показали расчеты, чтобы обеспечить в камере температуру не выше 550° Ц при давлении 130 ат, в нее нужно подать 13,75 кг воды и 3,7 кг жидкого кислорода на 1 кг мазута. Получающееся в результате этого рабочее тело состоит на 80% (по весу) из водяного пара и на 20% из смеси CO₂ и остатка O₂. Таким образом, практически получается несколько видоизмененный паровой цикл с сжиганием топлива внутри «котла». Следовательно, описанную установку целесообразно сопоставлять с нормальной паровой. С точки зрения компактности и простоты такая установка имеет несомненные преимуще-

ства перед обычной паросиловой станцией. Турбина остается почти той же, но весь котельный агрегат заменяется камерой сгорания. В случае работы на выхлоп отпадает конденсационная установка, а при работе с конденсацией пара не требуется водоподготовка.

Экономичность этой установки по сравнению с обычной паросиловой обеспечивается ликвидацией потерь тепла с отходящими газами. Кроме того, в этой установке удастся использовать высшую теплотворную способность топлива, так как водяной пар, получающийся при сгорании, не теряется, а используется в цикле для совершения работы. Однако, и в этой установке останутся основные потери тепла котельного агрегата — скрытая теплота отработанного пара. В результате при работе на выхлоп кпд такой турбинной установки не превосходит 28%. Следовательно, с учётом всех потерь сжигание 1 кг топлива даст лишь 3,42 квт-ч. Если учесть расход электроэнергии на производство жидкого кислорода для такой установки, то нетрудно прийти к выводу, что и этот агрегат экономически себя не оправдывает.

Остается рассмотреть циклы с использованием газообразного кислорода. В этих циклах имеет место значительный добавочный расход энергии на сжатие кислорода до давления, равного давлению в топочной камере. Если кислородная установка даёт кислород с давлением в 5 ат, то для сжатия его до 130 ат приходится затрачивать около 0,4 квт-ч на 1 кг сжигаемого в турбине топлива. Кпд турбинной установки при этом составит 28,7%, а с учётом расхода энергии на производство кислорода (0,3 квт-ч на 1 м³) общий кпд не превысит 22,5%. Если кислородная установка будет выдавать кислород при атмосферном давлении, то расход энергии на его компримирование увеличивается до 0,6 квт-ч на 1 кг топлива и общий кпд агрегата снижается до 21%.

Подсчитано, что турбинная установка, потребляющая 10 000 м³ кислорода в час, будет иметь следующее распределение мощностей:

Расход топлива (мазута) 3 900 кг/ча
Мощность турбины 17 000 квт

Собственный расход мощности:

- а) на питательный (для воды), циркуляционный и топливный насосы 400 квт
- б) на компрессор для подачи кислорода в камеру сгорания 2 300 »
- в) на компрессор для отсоса углекислого газа из конденсатора 1 300 »
- г) на кислородную установку 3 000 »
- Мощность установки (нетто) 10 000 »

Таким образом, при съеме полезной мощности 10 000 квт потребуется иметь весьма крупный поршневой компрессор для подачи кислорода и не менее громоздкий компрессор для отсоса углекислого газа из конденсатора. Это означает полный отказ от преимуществ простоты и компактности установки. Вместе с тем, кпд, равный 21%, при расходе топлива 0,585 кг на 1 квт-ч, не превосходит экономичности рядовых конденсационных станций. Таким образом, произведённые подсчёты указывают на крайнюю ограниченность перспектив применения кислорода для газовых турбин.

Из всего изложенного следует сделать вывод, что применение кислорода в энергетике при современных способах и стоимости его получения мало эффективно и может быть экономически и технически оправдано лишь для ограниченного числа специальных случаев. Это объясняется в значительной мере тем обстоятельством, что современные энергетические установки являются в тепловом отношении достаточно экономичными агрегатами и возможности для дальнейшей экономии топлива весьма ограничены.

Совершенно другая картина представляется нам при рассмотрении большого числа типов различных технологических печей: сталеплавильных, цементных, камнеплавильных. Тепловая экономичность этих печей по сравнению с котельными установками весьма низка и не столько благодаря несовершенству аппаратуры, сколько в связи с отсутствием потребителя тепла низкого потенциала. Так, например, вращающаяся цементная печь имеет тепловой кпд около 25% при так называемом «сухом» процессе и 50% при «мокром» процессе. Учитывая, что кпд современных котлов составляет около 85—90%, представляется весьма заманчивым объединение цементной печи и парового котла в одном агрегате с выпуском из топки плавленых вяжущих веществ. При таком комбинированном процессе получение технологической продукции будет идти с тепловым кпд, равным кпд котла, и, следовательно, должно повести к значительной экономии топлива. Подсчёты, проводившиеся во Всесоюзном теплотехническом институте в 1937—1938 гг., показали, что на 1 т портланд-цемента, выпускаемого комбинированным процессом, может быть сэкономлено 40—50 кг топлива. Эксплуатационные расходы уменьшаются при этом на 8—9 руб./т; а экономия в капиталовложениях

составит 12—15 млн. руб., считая для завода производительностью 400 000 т цемента в год.

На рис. 5 приведены показатели экономичности комбинированного процесса произ-

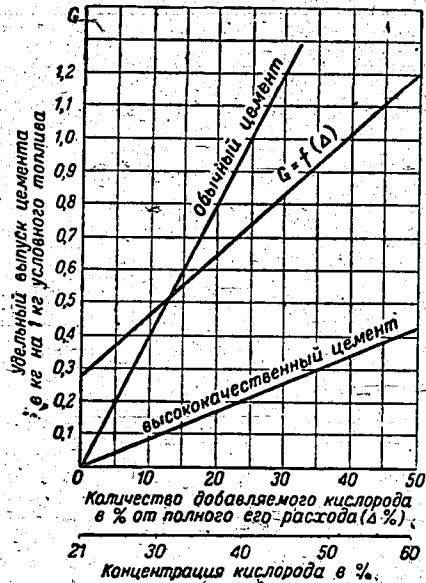


Рис. 5. Показатели экономичности комбинированного процесса производства пара и цемента в зависимости от содержания кислорода в дутье.

водства пара и цемента в зависимости от содержания кислорода в дутье.

Комбинированное производство пара и цемента является одним из большого числа возможных комбинированных процессов, которые могут сделать рентабельным применение кислорода. Весьма интересной представляется также комбинация «котёл — мартеновская печь», «котёл — камнелитейная печь». При наличии кислородного дутья можно значительно упростить конструкцию этих печей, сделав их прямоточными. Экономичность комбинированного процесса на кислородном дутье не нуждается в доказательствах. По данным акад. И. П. Бардина (см. бюллетень «Кислород» № 1, 1944 г.), кислород оказывается экономичным для мартеновской печи, работающей и без котла. Этот вопрос с теплотехнической стороны довольно подробно рассмотрен в работе проф. Н. А. Семененко (Московский энергетический институт им. Молотова), печатаемой в этом сборнике. Применение обогащённого кислородом

дутья является наиболее перспективным вариантом энергетической модернизации сталеплавильной печи.

Комбинированные энерготехнологические процессы ещё недостаточно изучены. Они требуют совместной разработки энергетиками и технологами. Однако, предварительные, самые общие подсчёты говорят за то, что применение кислорода в этих процессах является наиболее обещающим.

В заключение рассмотрим один из примеров косвенного влияния кислорода на энергетику. Таким примером является газификация топлива на кислородном дутье непосредственно на месте его добычи и подача богатого ($4500-5000 \text{ ккал/м}^3$) газа на электростанции. Не останавливаясь на общей экономике такого процесса, следует сказать, что в работе электростанции будут иметь место значительные изменения: отпадает необходимость в устройстве угольных складов, топливоподачи, бункеров сырого угля, системы пылеприготовления, гидрозолоудаления, обдувки и т. д. В результате уменьшится стоимость станции, занимаемая ею площадь (что для городских условий имеет большое значение), сократится количество обслуживающего персонала и т. д. По расчётам данным эти изменения могут быть выражены следующими цифрами (для станции мощностью в 50 мвт):

Стоимость установленного кст:

а) для станции на угле	2000 руб.
б) " " " газе	1500 "

Количество рабочей силы на 1 мвт, приведённый к-конденсационной мощности:

а) для станции на угле	3,25 чел.
б) " " " газе	2,33 "

Таким образом, имеет место сокращение капиталовложений на 25% и уменьшение потребности в рабочей силе на 30% по сравнению со станцией, работающей на угле. Общая экономичность всего процесса в целом требует более детального анализа, но в части, касающейся энергетики, приведённые цифры являются достаточно показательными.

ОБСУЖДЕНИЕ

Акад. П. Л. Капца: Выводы из доклада ясны. Трудно значительно повысить КПД котельного агрегата, равный 90%. Наи-

больший интерес представляет для нас вопрос об организации комплексных хозяйств на базе кислородного дутья. Совершенно естественно, что энергетические установки, вырабатывающие пар при температуре не выше 500°C , должны комбинироваться с другими отраслями производства — металлургической, химической, цементной, чтобы использовать их тепловые отходы. На организацию комплексных хозяйств, как область применения кислорода, нам нужно обратить особое внимание. Именно в Советской стране условия для создания таких хозяйств исключительно благоприятны и до сих пор по-настоящему не используются.

Большое значение имеет проблема газовых турбин, кратко освещённая в докладе. Современные электростанции, превращающие энергию топлива в паровую, а затем в механическую и, наконец, в электроэнергию, весьма несовершенны. Когда-нибудь энергетики научатся превращать химическую энергию окисления непосредственно в электрическую. Очевидно, и кислород в таких процессах сыграет свою роль. В этом смысле газовые турбины и их усовершенствование представляют большой интерес. Но мне кажется, что было бы принципиально неправильным хотя бы косвенным путём снова вводить воду в этот процесс, как упоминалось в докладе. Ведь именно газовая турбина избавляет нас от необходимости иметь громоздкое паросиловое хозяйство.

Инж. В. А. Голубцов (НКЭС СССР): Применение кислорода или обогащённого им воздуха на современных электростанциях не даёт особого эффекта. Единственно правильный путь дальнейших работ в этом направлении — это развитие комплексного энергетического хозяйства. Однако, эта проблема не по силам одним энергетикам. Над ней должны работать специалисты различных отраслей техники.

Организация комплексного хозяйства является наиболее желательной и целесообразной в тех случаях:

1) когда имеются большие остатки тепла в процессах, протекающих при высоких температурах (такими являются, в частности, металлургические процессы);

2) когда необходимо ускорить процесс и получить более ценную продукцию.

Хорошим примером такого процесса может служить сжигание низкосортных топлив на кислородном дутье. В настоящее время промежуточные породы, залегающие между

угольными пластами, идут в отвалы. В большинстве случаев — это глинистые сланцы с небольшим содержанием угля. Сжигание таких сланцев в присутствии кислорода пойдёт достаточно энергично. При этом тепла хватит для того, чтобы расплавить золу и получить из неё каменное литьё и другие важные строительные материалы.

Использование кислорода даёт возможность совершенно по-новому организовать производственные процессы. Вот один из характерных примеров. Многие угли, как известно, содержат окись алюминия (челябинские угли, например, — 24—25%, подмосковные — 35—45% и т. д.). Использование золы этих углей для производства алюминия представляет большие трудности и связано с затратой ценных химикатов. Если в уголь при его помоле добавлять щёлочь, соду или соответствующие породы, содержащие их, то при сжигании этой смеси в присутствии кислорода будет получен готовый алюминат натрия и затем — окись алюминия. Таким образом, имеет место кооперирование производства глинозёма и окиси алюминия с производством электроэнергии, причём последняя используется для производства алюминия.

Инж. К. Д. Лавриненко (НКЭС СССР): Применение кислорода в современной энергетике действительно не даст такого экономического эффекта, как в чёрной металлургии.

Будущее в развитии энергетики, бесспорно, принадлежит комбинированным процессам. Однако, развитие этих процессов тормозится известной инертностью ряда наших инженерно-технических работников. Повидимому, в результате такой инертности не внедряется в чёрную металлургию котёл, разработанный МЭИ (проф. Н. А. Семенов) в комбинации с мартеновской печью, хотя этот вопрос уже достаточно проработан и известен довольно широкому кругу специалистов.

Однако, рассматривая проблемы комплексных энергетических процессов, не нужно забывать и вопросов внедрения кислорода непосредственно в энергетику в ближайший период времени. Известно, что энергетика

является крупнейшим потребителем топлива главным образом низкокалорийного. Применение при этом кислорода будет весьма эффективным, так как в значительной степени интенсифицирует процесс горения. Нужно также иметь в виду, что применение кислорода повысит производительность существующих котельных агрегатов. В этой области следует развернуть экспериментальную работу по созданию новых конструкций котлов высокой производительности при малых габаритах, которые смогут работать на низкосортном топливе, не находящем сейчас применения.

Инж. Л. С. Галынкер (Энергетический институт Академии наук СССР): Комбинированное производство пара и цемента представляет особый интерес. На электростанциях образуются тысячи тонн золы, не имеющей в настоящее время никакой ценности. Однако, в тех же печах при наличии кислородного дутья и определённых добавок можно получать не только пар, но и значительное количество высококачественного цемента.

При современном способе производства цемента на тонну продукта тратится 300 кг условного топлива. При комбинированном процессе на тонну цемента будет затрачено только 120 кг топлива. Таким образом, при широком внедрении комбинированного производства пара и цемента можно будет сэкономить несколько миллионов тонн топлива в год.

Инж. Б. М. Соколов (ОРГЭС НКЭС): Нельзя согласиться с тем, что применение кислорода на существующих электрических станциях нерентабельно. Пылеугольные станции сжигают сейчас несколько десятков тысяч тонн мазута в год. Используя кислород, мы можем совершенно отказаться от потребления мазута и, кроме того, увеличить производительность котельных агрегатов. Я считаю, что применение кислорода позволит нам сэкономить 10—12% топлива. Особенно большой эффект может дать сооружение новых конструкций котельных агрегатов, специально сконструированных для работы на кислородном дутье. В этом отношении нужно проделать соответствующие эксперименты.