

629/133
У 49

Б. М. ЧЕРНОМОРДИК

ТЕОРИЯ и РАСЧЕТ ТРАНСПОРТНЫХ ГАЗОГЕНЕРАТОРОВ

МАШГИЗ · 1943

8683

КАНД. ТЕХН. НАУК, ДОЦЕНТ
Б. М. ЧЕРНОМОРДИК

626.12
4-49

629.113.3

4-49

ТЕОРИЯ И РАСЧЕТ ТРАНСПОРТНЫХ ГАЗОГЕНЕРАТОРОВ

41130
12333
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ БИБЛИОТЕКА БССР

Под ред. канд. техн. наук
И. С. МЕЗИНА

№ 9, 96, 08

Дел.

РЕСПУБЛИКАНСКАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА БССР

ГОРГОХ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА БССР

НТМ СССР
ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
Москва 1943 Свердловск

В настоящей работе дано методическое изложение основных вопросов теории и расчета транспортных газогенераторов. Особое внимание обращено на объяснение физико-химической сущности газогенераторного процесса в свете современных представлений о механизме горения твердого топлива.

Круг вопросов, разобранных в книге, охватывает лишь газогенератор — как основной компонент газогенераторной установки. В главе, посвященной конструкциям, дан анализ двух основных типов газогенераторов, принятых в СССР к крупносерийному производству, и указан метод определения параметров, характеризующих работу агрегата.

Книга рассчитана на инженерно-технических работников, работающих в области газогенераторостроения и эксплуатации газогенераторов, и может служить в качестве дополнительного пособия к вузовским курсам по легким газогенераторам.

Редактор В. Розенфельд

Подп. к печати 4/IX 1943 г.
11 печ. листов.

Л58389

Уч.-изд. листов 13,85.

Цена 7 р. 50 к.

Тираж 5000 экз.
Заказ 228

13-я тип. ОГИЗ, Москва, Демьяновский, 30

СОДЕРЖАНИЕ

От автора	5
I. Введение	
1. Краткий очерк истории развития транспортных газогенераторов .	6
2. Схемы процессов газификации. Принципиальная схема газогенераторной установки	9
II. Топливо, применяемое в газогенераторах	
1. Древесное топливо	14
2. Древесный уголь	23
3. Каменные угли и антрацит	27
4. Торф	29
5. Бурый уголь	32
6. Брикеты	34
III. Физико-химические основы процесса газификации	
1. Условия равновесия основных реакций процесса газификации . .	35
2. Современные теории горения углерода	38
3. Основные реакции газогенераторного процесса	47
IV. Тепловой расчет газогенератора	
1. Состав газа	65
2. Подсчет средней теплотемкости продуктов газификации	65
3. Подсчет элементарного состава газа	67
4. Коэффициент полноты сгорания	68
5. Подсчет выхода газа	70
6. Определение количества первичного воздуха	70
7. Определение количества связанного водорода. Правило Дюлонга .	71
8. Содержание паров воды в 1 м ³ влажного газа	72
9. Условия получения сухого генераторного газа	72
10. Составление материального баланса	78
11. Тепловой баланс. Приход тепла от экзотермических реакций . .	73
12. Физическая теплота паров воды и воздуха	74
13. Расход тепла	75
14. Внешние потери на лучеиспускание и конвекцию	75
15. Уравнение теплового баланса	79
16. Коэффициент полезного действия газогенератора	79
V. Конструктивный расчет газогенератора	
1. Увязка теплового и конструктивного расчетов	80
2. Определение размеров бункера	82
3. Определение размеров камеры газификации	83
4. Методы определения высоты активной зоны	86
5. Определение размеров зольника	96
6. Примерный тепловой расчет газогенератора	98

VI. О взаимодействии газогенератора и двигателя

1. О соответствии газогенератора двигателю	106
2. Предельная нагрузка	114
3. Влияние переменной нагрузки на работу газогенератора	121
4. Влияние неравномерности процесса газификации на работу двигателя	128

VII. Анализ конструкций серийных советских газогенераторов

1. Газогенераторы ЗИС-21 и Г-14 (ГАЗ-42)	130
2. Тепловая нагрузка и сопротивление	131
3. Скоростной характер процесса	133
4. Влияние габаритов камеры на процесс газификации	136
5. Смолосодержание	138
6. Температура в камере	140
7. Подогрев бункера и первичного воздуха	141
8. Зольник	144
9. Газогенераторы, работающие по горизонтальному процессу . . .	145
10. Исследование активной зоны газогенератора Г-21	146
11. Влияние размера кусков топлива на процесс газификации . . .	153
12. Влияние добавки воды на процесс газификации	156
13. Пусковые качества газогенератора типа Гоэн-Пулен	159

VIII. Генераторный газ как моторное топливо

1. Причина падения мощности двигателя при его переводе на генераторный газ	160
2. Современные методы борьбы с падением мощности	163
3. Характеристика горючих компонентов генераторного газа	168

IX. Современные тенденции в развитии транспортных газогенераторов

Литература	176
----------------------	-----

ЗИНОВИЮ АЛЕКСАНДРОВИЧУ
ЛИВИЦУ
другу и поэту
посвящает эту работу Автор

ОТ АВТОРА

Предлагаемая работа является теоретической частью курса „Транспортные газогенераторы“, прочитанного автором в 1939 — 1941 гг. в Промакадемии им. Л. М. Кагановича.

Традиционные положения редукционной теории газификации здесь подвергнуты критике с точки зрения современных представлений о механизме процесса горения.

В связи с этим были пересмотрены данные о наиболее распространенных у нас газогенераторах и выработан ряд параметров, характеризующих их работу.

Особое внимание обращено на физико-химическую сторону газогенераторного процесса и на взаимодействие режимов работы генератора и двигателя внутреннего сгорания.

Книга была закончена уже во время Отечественной войны и отъезд автора на фронт не позволил ему уделить внимания той окончательной шлифовке работы, которая обычно возникает в процессе редактирования. Научный редактор И. С. Мезин в отсутствие автора со скупудезным вниманием пересмотрел рукопись и внес в нее ряд ценных примечаний, за что автор приписит ему глубокую благодарность.

1. ВВЕДЕНИЕ

1. Краткий очерк истории развития транспортных газогенераторов

Началом развития и широкого применения легких газогенераторов можно считать 1914 г., когда экономические предпосылки, вызвавшие к жизни эту новую отрасль техники, начали сказываться особенно остро. В начале войны во Франции был организован первый пробег грузового автомобиля с газогенераторной установкой. Пробег состоялся между Парижем и Руаном (126 км), но не дал положительных результатов. Интересно отметить, что по этому же маршруту в 1894 г. (за 20 лет до пробега грузовика с газогенератором) состоялись первые гонки автомобилей, больше известных тогда под названием „экипажей без лошадей“. Автомобиль Пежо с бензиновым мотором Даймлера также потерпел тогда поражение, уступив место паровой коляске Серполе.

Таким образом, транспортный газогенератор и автомобиль почти ровесники. Но история газогенератора начинается значительно раньше. Построенный впервые в виде отдельного агрегата в 1839 г. Бишофом в Магдебурге на Гарце газогенератор почти столетие развивался, как стационарная установка для газификации твердого топлива.

В 1842 г. в Австрии, в Аудикурте, на заводе С.-Стефан, Эбельманом был построен другой газогенератор, в котором впервые был применен принцип обратного горения. Этот принцип получил впоследствии широкое распространение на транспортных установках, так как чрезвычайно удачно разрешал вопрос о разложении паров воды и сжигании смолистых веществ, получающихся при газификации древесного топлива.

Появлению газогенераторов Бишофа и Эбельмана предшествовали интересные работы французов Фабер де Фор и Оберто, предложивших пользоваться колосниковыми газами доменных печей для нагревательных целей. Их опыты относятся скорее к работам по утилизации отходов доменного процесса и могут рассматриваться лишь как рационализаторские мероприятия, хотя оба француза и были весьма близки к идее самостоятельной газогенераторной установки.

Устройством газогенератора для двигателя внутреннего сгорания, вернее—идея сочетаний этих двух агрегатов—принадлежит Эмеру Дауссону, поэтому генераторный газ назывался одно время газом Дауссона. Распространение двигателей вызвало

потребность в дешевом газе. Поэтому, воспользовавшись опытом Дауссона, завод Крослей (в 1889 г.), а за ним и Отто-Дейк взялись за конструктивную разработку сочетания газогенератора с двигателем. Блестящий успех идеи Дауссона обеспечивался всей предыдущей историей развития теплотехники.

Еще задолго до появления первых работоспособных двигателей различными изобретателями были предложены конструкции, в которых в виде топлива предполагалось использовать каменноугольный газ. Так, в 1791 г. Джоном Барбером был взят патент на газовую турбину, работающую на смеси газа, полученного из твердого топлива, с воздухом. В 1801 г. француз Лебон взял патент на газовый двигатель двойного действия. Все дальнейшее развитие двигателей внутреннего сгорания от Лебона и Лепуара, создавшего в 1860 г. первую практически годную машину, до Дизеля шло параллельно с развитием стационарных газогенераторов, стимулируя и дополняя друг друга.

Когда начали строить транспортные газогенераторы, традиции стационарной техники были полностью перенесены на новую машину, надолго определив характер ее развития. Способы охлаждения и очистки газа, теория процесса, методика теплового расчета, оптимальные соотношения основных размеров, — все, что было получено в результате опыта почти вековой эксплуатации, было использовано при конструировании новых машин.

Такая преемственность имела свои хорошие и плохие стороны. Специфические особенности транспортных газогенераторов (малые габариты, неустойчивость процесса газификации, переменный режим и необходимость более тщательной очистки и охлаждения газа) вскоре заставили конструкторов выйти за рамки стационарной техники. Ряд вопросов, связанных с переводом двигателей с жидкого топлива на генераторный газ, потребовал дополнительных решений. Мощность двигателя при переводе на генераторный газ падала на 40 — 45%. Это обстоятельство в сочетании с необходимостью увеличить мертвый вес машины приводило к значительному ухудшению динамики автомобиля и трактора. Таким образом, снижение потерь мощности двигателя и уменьшение веса и габаритов установки явились необходимой предпосылкой для успешного решения газогенераторной проблемы.

Газогенераторная техника за последние 15 — 20 лет достигла больших успехов. Рост мирового автотракторного парка сильно увеличил потребление жидкого топлива. Чрезвычайно неравномерное распределение нефти на земной поверхности скоро поставило ряд стран перед необходимостью найти заменителей этого сравнительно редкого ископаемого. В особо тяжелых условиях очутилась Франция, энергетические ресурсы которой хуже других стран Европы. Переход с бензина на национальное топливо во Франции предполагался на следующих условиях: новое горючее в экономическом отношении должно быть в состоянии конкурировать с бензином, — иными словами, оно должно быть достаточно дешево; кроме того, переход на

новое топливо не должен вызывать крупных переделок в двигателе.

Обследования первого условия — достаточной дешевизны суррогата — показали, что ни бензол, ни другие углеводороды не могут быть получены достаточно экономично и лишь генераторный газ из дров, древесного угля и карбонита¹ может дать необходимый экономический эффект. Что касается второго требования — не вносить значительные изменения в двигатель, то оно было вызвано тем обстоятельством, что Франция, располагая большим автотракторным парком, не считала реальным решением вопроса путь, требующий крупных изменений существующих конструкций.

Целый ряд конкурсов и пробегов газогенераторных автомобилей, организованный в Европе с 1922 г., сильно содействовал развитию нового вида транспорта. К этому времени относится и начало развития легких газогенераторов в Советском Союзе. Однако вплоть до 1930 г. постройка и изучение транспортных газогенераторов были связаны у нас с деятельностью отдельных конструкторов и изобретателей. Пионерами в этой области были: проф. Наумов, построивший в 1921 г. первую советскую автомобильную газогенераторную установку, работавшую на древесном угле, Декаленков, конструировавший древесные газогенераторы для советских тракторов и автомобилей, и др.

С 1930 г. исследованием и конструированием легких газогенераторов начали заниматься научно-исследовательские институты. При НАТИ, ВИСХОМ и других институтах были организованы специальные газогенераторные отделы, обеспечившие дальнейшее развитие советских газогенераторных установок.

Следующим этапом в развитии советского газогенераторостроения, несомненно, является решение XVIII Партсъезда по докладу т. Молотова, в котором говорилось о необходимости всемерно содействовать переводу автотракторного парка на твердое топливо. После этого начинается массовое производство транспортных газогенераторных установок в масштабах, которых не знало еще ни одно капиталистическое государство.

По мере увеличения производства легких газогенераторов накапливался эксплуатационный и технологический материал, характеризующий их работу. Изучение процесса газификации позволило по-новому подойти к конструированию и расчету основных узлов газогенераторов. Новые методы борьбы с падением мощности двигателя при переводе его с бензина на газ совершенно изменили технико-экономические предпосылки газогенераторной проблемы. Сочетание скоростной газификации с новыми более совершенными методами очистки и охлаждения газа позволит значительно уменьшить вес и габариты газогенераторной установки транспортного типа.

¹ Карбонит представляет собой древесноугольный брикет, приготовленный по способу проф. Гуталья (Франция). Его форма — шар. — Р е д.

2. Схемы процессов газификации. Принципиальная схема газогенераторной установки

Прежде чем перейти к изучению теории и конструкции легких газогенераторов, полезно ознакомиться с общей схемой процессов газификации.

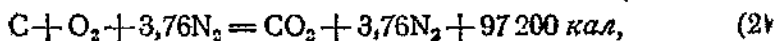
Газогенераторный процесс является результатом взаимодействия трех основных компонентов — топлива, воздуха и гигроскопической влаги, содержащейся в топливе. Пары воды, всегда находящимися в воздухе, обычно в расчетах пренебрегают ввиду их сравнительно небольшого количества.

По характеру направления газового потока в газогенераторе различают прямой, опрокинутый (или обратный) и горизонтальный процессы. При газификации по прямому процессу, имеющему большое распространение в стационарной технике, воздух, необходимый для газификации твердого топлива, подводится в нижнюю часть генератора. Газовый поток при этом движется сквозь топливо снизу вверх (фиг. 1). В месте соприкосновения раскаленного топлива с воздухом, на колосниковой решетке, протекает процесс горения.

Углерод топлива соединяется с кислородом воздуха. Это соединение, согласно современным воззрениям на процесс горения твердого топлива, идет сложными и еще не вполне изученными путями. В главе, посвященной теории газогенераторного процесса, мы подробнее остановимся на реакциях горения С. Здесь же ограничимся схемой, по которой конечный результат взаимодействия С с O_2 может быть выражен уравнением

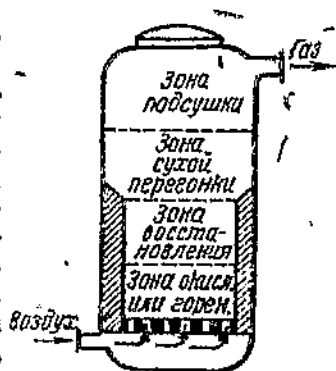


Зона, в которой происходит процесс сгорания С топлива в CO_2 , называется зоной горения или окисления. Реакция (1) идет с большим выделением тепла. Если учесть, что в воздухе, подаваемом в газогенератор, помимо O , присутствует еще азот, не участвующий в реакции, то уравнение (1) для 1 моля С переписывается так:



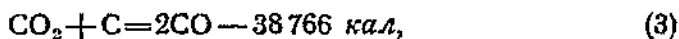
где 97 200 — тепловой эффект реакции.

Если бы газогенераторный процесс на этом закончился, то газ нельзя было бы использовать в двигателе как топливо, потому что CO_2 является продуктом полного сгорания С и не содержит химической энергии. За счет избытка тепла, получаемого в зоне горения, нагревается верхний слой топлива. Проходя



Фиг. 1. Схема прямого процесса газификации.

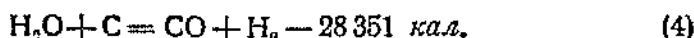
через него, продукты полного сгорания восстанавливаются по реакции



идущей с поглощением тепла.

Таким образом, тепло, выделившееся в зоне горения, полезно используется в восстановительной зоне для получения продуктов неполного горения.

Помимо редукиции CO_2 в зоне восстановления идет эндотермическая реакция разложения паров воды по уравнению



Водяной пар, участвующий в этой реакции, может быть получен в результате распада клетчатки топлива (так называемая химическая вода) и за счет гигроскопической влаги топлива. При прямом процессе в реакции водяного газа участвует главным образом химическая вода¹. Зоны горения и восстановления составляют вместе так называемую активную зону, в которой идут основные реакции газогенераторного процесса. Температурные условия слоев топлива, лежащих над активной зоной, не обеспечивают протекание указанных реакций. Однако они являются достаточными для процесса сухой перегонки. Сухой перегонкой, как известно, называется процесс, идущий при нагревании топлива без доступа воздуха до определенной температуры.

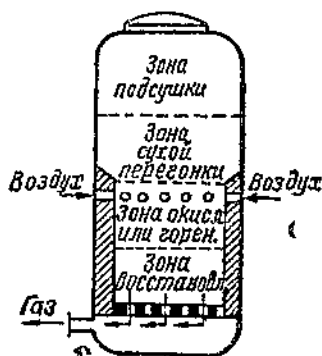
При работе газогенератора на древесном топливе в его верхних слоях идет сухая перегонка древесины. При нагревании топлива до 100° оно подсушивается. До тех пор пока не испарится вся гигроскопическая влага, температура топлива не поднимается. После окончания подсушки температура начинает быстро повышаться. Выделяющиеся из древесины продукты сначала желтеют, а затем принимают бурую окраску. При нагревании выше 280° начинается бурное разложение древесины, которое идет экзотермично и заканчивается в основном к 400° .

В результате сухой перегонки получается около сотни самых разнообразных твердых, жидких и газообразных продуктов, среди которых особое значение для газогенераторного процесса имеют тяжелые углеводороды и смолистые вещества. Таким образом, над активной зоной при прямом процессе последовательно располагаются зона сухой перегонки и зона подсушки. При отборе газа в верхней части газогенератора продукты газификации механически смешиваются с продуктами, полученными в верхних слоях топлива, что при работе на топливе с большим содержанием смолистых веществ является недопустимым, если газ предназначен для двигателя.

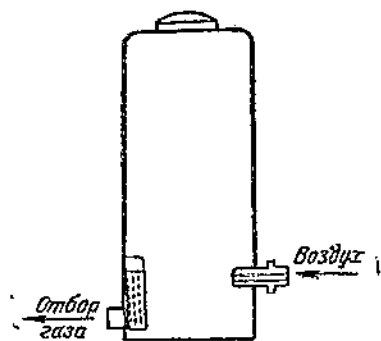
Большое распространение получили транспортные газогенераторы, работающие по опрокинутому процессу. В этом случае воздух подводится к средней части газогенератора, продукты

¹ Гигроскопическая влага топлива испаряется в бункере до момента его сгорания. Ред.

газификации отводятся снизу (фиг. 2). При таком направлении газового потока зона горения располагается над восстановительным слоем топлива, а зоны подсушки и сухой перегонки остаются на прежнем месте. Теперь продукты, получающиеся в верхней части газогенератора, не могут механически смешаться с генераторным газом, а должны пройти зону высоких температур, прежде чем выйти из генератора. При прохождении через активную зону часть продуктов сухой перегонки должна сгореть, а часть водяных паров разложиться. В атмосфере высокой температуры часть продуктов сухой перегонки крекируется.



Фиг. 2. Схема обратного процесса газификации.

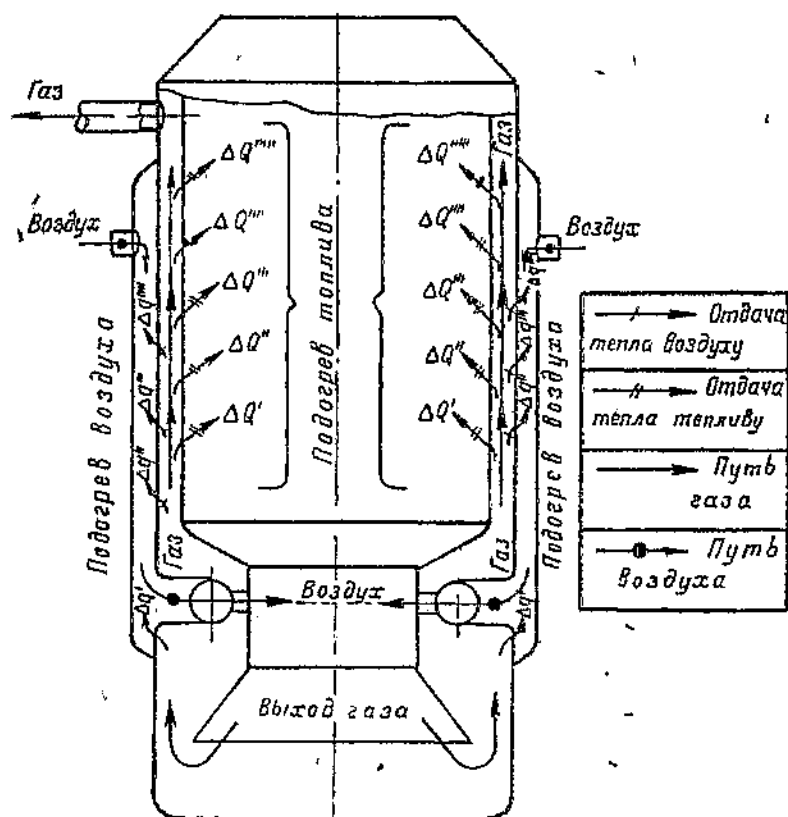


Фиг. 3. Схема горизонтального скоростного процесса (газогенератор типа Гозн-Пулен).

Газовый поток может быть также направлен горизонтально (фиг. 3). При этом габариты газогенератора несколько уменьшаются за счет сокращения нижней части. Зоны подсушки и сухой перегонки располагаются попрежнему над активной зоной. Горизонтальное расположение активной зоны применяется также и в скоростных газогенераторах (фиг. 4). Теория скоростного процесса газификации будет подробно разобрана в дальнейшем. Здесь же отметим, что в скоростных газогенераторах отсутствует резкое деление активного слоя на зоны горения и восстановления. Объем активной зоны, не превышающий обычно нескольких литров, имеет вытянутую грушевидную форму. Результатом процесса газификации, идущего в активной зоне, является CO , поэтому отпадает необходимость в дальнейших химических превращениях.

Горизонтальный скоростной процесс в настоящее время широко применяется при газификации древесного угля. При создании компактной автомобильной газогенераторной установки ближайших лет скоростной процесс, несомненно, сыграет решающую роль. При сравнении прямого и опрокинутого процессов приходится согласиться с тем, что последний имеет ряд преимуществ. При газификации древесины, как уже указывалось, в верхних слоях топлива выделяются пары воды и продукты сухой перегонки.

При газификации по прямому процессу эти продукты смешиваются с генераторным газом. В опрокинутом процессе пары воды и смолистые вещества проходят через активную зону. Пары воды способствуют течению реакции водяного газа, в результате которой получаются ценные H_2 и CO , а смола сгорает, повышая температуру активной зоны. При газификации



Фиг. 4. Схема теплопередачи в газогенераторе.

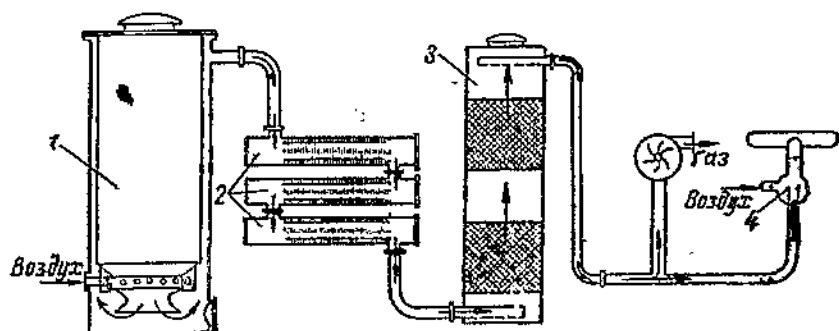
по прямому процессу топливо опускается в восстановительную зону непосредственно из зоны сухой перегонки и часто бывает недостаточно обугленным.

В газогенераторах, работающих по опрокинутому процессу, топливо попадает в зону восстановления, пройдя зону горения, и поэтому более подготовлено для реакций водяного газа и восстановления CO_2 .

В газогенератор, работающий по опрокинутому процессу, можно загружать топливо, не останавливая двигателя, в то время как при работе на прямом процессе это вызывает остановку двигателя.

Высота активной зоны, как будет видно из дальнейшего, имеет большое значение для газогенераторного процесса. В газогенераторе с опрокинутым процессом эта высота строго фиксируется расстоянием от места подачи воздуха до нижнего края камеры газификации. При газификации по прямому процессу высота активной зоны определяется высотой слоя топлива, через который проходит генераторный газ. Высота этого слоя меняется по мере выгорания топлива. Таким образом, при прямом процессе высота активной зоны может иногда меняться, что усиливает колебания химического состава газа.

Из рассмотренных схем видно, что газогенератор состоит из трех основных частей. Верхняя часть, в которой происходит подсушка и сухая перегонка топлива, называется бункером. В бункере сосредоточен 2—3-часовой запас горючего и топливо готовится к процессу газификации. Средняя часть, в которой расположена активная зона, называется топливником или камерой газификации. Нижняя часть газогенератора, находящаяся под камерой газификации или под колосниковой решеткой, называется зольником. Здесь собираются зола и угольная пыль, остающиеся после газификации топлива. Назначение отдельных деталей газогенератора понятно из фиг. 5.



Фиг. 5. Принципиальная схема газогенераторной установки.

Газогенератор является основным элементом установки. Но выходящий из генератора газ не может быть непосредственно подан в двигатель.

Высокая температура газа сильно снизила бы коэффициент наполнения двигателя. Кроме того, выходя из генератора, газ уносит с собой мелкие частицы топлива и золу. Попадая в цилиндры двигателя, эти твердые примеси увеличили бы износ машины. Поэтому генераторный газ необходимо охладить и очистить от пыли. Обработанный таким образом газ должен быть хорошо перемешан с воздухом для образования рабочей смеси.

Таким образом, газогенераторная установка состоит из газогенератора 1, системы охладителей 2, очистителей 3 и смесителя 4. Во многих современных установках очистка и охлаждение газа выполняются одновременно и специальных охладителей не имеется.

II. ТОПЛИВО, ПРИМЕНЯЕМОЕ В ГАЗОГЕНЕРАТОРАХ

Топливо, применяемое в легких газогенераторах, чрезвычайно разнообразно. Современные тенденции расширить энергетическую базу газогенераторного автотракторного парка нашли отражение в многочисленных конструкциях установок, предназначенных для различных видов топлива. Однако попытки создать „всеядный“ газогенератор, приспособленный для работы на многих сортах горючего, сопряжены с большими трудностями¹. Слишком разнообразны особенности каждого из них. Помимо древесного угля и древесины, наиболее распространенного топлива для газогенераторов, в настоящее время газифицируются антрацит, каменный и бурый угли, торф и соломенные брикеты. Правда, окончательное освоение этих видов горючего еще не закончено.

1. Древесное топливо

Древесина — наиболее распространенный вид „местного“ топлива. Общая площадь лесов в СССР достигает 900 млн. га, что составляет около 30% мирового запаса. Эти лесные богатства эквивалентны 18 млрд. т условного топлива (7000 кал/кг) при ежегодном расходе около 70 млн. т.

Древесина состоит из органической массы и балласта. Состав органической массы топлива мало зависит от породы дерева и колеблется в незначительных пределах. Средний химический состав древесины по Менделееву: С — 50%; Н — 6%; О — 43,1%; N — 0,3%; зола — 0,6%.

Химический состав органической массы по данным Виолетта для разных пород дерева приведен в табл. 1.

Таблица 1
Химический состав органической массы древесины
по данным Виолетта

Название древесной породы	Состав органической массы в %				Высшая теплотворная способность органической массы кал/кг
	С	Н	О	N	
Дуб	50,35	6,05	42,34	1,20	4390
Бук	49,5	6,1	43,49	0,9	4500
Лиственница	50,1	6,3	42,6	1,0	4465
Береза . . .	49,3	6,1	43,6	1,0	4460

К балласту топлива относят золу и гигроскопическую влагу:

$$B = A + W, \quad (5)$$

¹ В НАТИ разработана конструкция универсального газогенератора для работы на древесных чурках, торфе и буром угле. Газогенератор прошел испытания и строится сериями. Ред.

где A — зольность топлива в процентах от веса рабочего топлива,

W — относительная влажность.

Средняя зольность древесных пород колеблется от 1 до 1,4%, но для отдельных частей дерева может сильно отличаться от этих значений. Например зольность листьев достигает 7,1%, нижняя часть корней дает 5% золы, зольность коры колеблется от 1,6 до 3,5%. Меньше всего дает золы древесина ствола — до 0,2 — 0,3%.

Зола древесины состоит из неорганических солей, около 67%, которых составляет поташ. Полное отсутствие S , малое количество и тугоплавкость золы создают очень хорошие условия для газификации древесины.

Большое влияние на работу газогенераторной установки оказывает влажность топлива. Влажность древесины меняется в широких пределах и определяет удельный вес и теплотворную способность рабочего топлива. Следует различать абсолютную и относительную влажность.

Относительная влажность представляет отношение веса влаги к весу сырого топлива и выражается в процентах следующей формулой:

$$W_{\text{отн}} = \frac{G_1 - G_2}{G_1} \cdot 100. \quad (6)$$

Отношение веса влаги к сухому топливу называется абсолютной влажностью:

$$W_{\text{абс}} = \frac{G_1 - G_2}{G_2} \cdot 100, \quad (7)$$

где G_1 — вес сырого куска топлива,

G_2 — вес абсолютно сухого куска топлива.

Связь между абсолютной и относительной влажностью определяется следующими соотношениями:

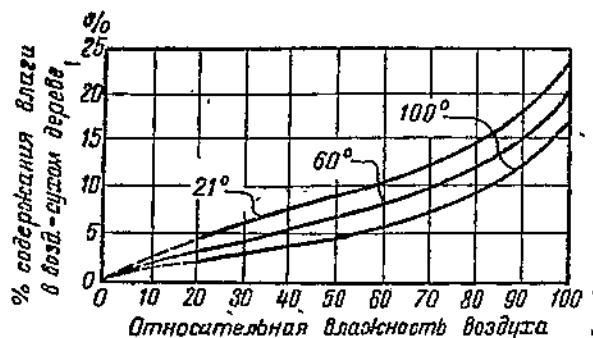
$$W_{\text{абс}} = \frac{W_{\text{отн}}}{100 - W_{\text{отн}}} \cdot 100; \quad (8)$$

$$W_{\text{отн}} = \frac{W_{\text{абс}}}{100 + W_{\text{абс}}} \cdot 100. \quad (9)$$

В некоторых породах свежесрубленного дерева влажность доходит до 60%. Газификация такого топлива затруднительна, а иногда и невозможна. Поэтому перед использованием в газогенераторах, в которых отсутствуют специальные приспособления для отвода избытка паров воды из бункера, такое дерево должно быть подсушено на воздухе или в специально оборудованных сушильнях. Подсушка дерева на воздухе происходит до тех пор, пока между влажностью древесины и влажностью окружающего ее воздуха не установится равновесие. Таким образом, степень подсушки зависит от температуры и относи-

тельной влажности воздуха (фиг. 6). Табл. 2 дает удельные веса дерева в зависимости от породы и степени подсушки.

Из фиг. 6 видно, что чем выше относительная влажность воздуха и ниже его температура, тем выше содержание влаги в воздушно-сухой древесине.



Фиг. 6. Зависимость влажности древесины от влажности и температуры с воздуха.

Таблица 2

Удельный вес различных пород дерева в зависимости от степени подсушки

Название древесной породы	Удельный вес			Содержание влаги в свежесрубленном дереве, %
	свежесрубленная	воздушно-сухая	подсушенная	
Дуб	1,075	0,708	0,640	34,7
Бук	0,982	0,591	0,540	39,7
Листовенница	0,925	0,470	0,410	41,6
Береза . . .	0,961	0,627	0,570	30,8

Как видно из табл. 1, химический состав органической массы древесины мало зависит от породы дерева. Так же мало отличаются друг от друга и составы генераторного газа, полученного из разных пород древесного топлива (табл. 3).

Таблица 3

Состав газа, полученного из разных пород древесины

Порода древесины	Влажность дерева в %	CO	H ₂	CH ₄	CO ₂	O ₂	N ₂	Данные
Береза	15,3	16,8	20,7	3,5	12,8	0,4	45,8	НАТИ
Дуб	15,6	14,55	11,85	6,55	13,24	0,73	53,08	.
Смесь: сосна и ель	16,0	17,0	12,0	3,8	Неопред.ленно		51,95	ВНИДИ ЦНИИСТ
Сосна (швырок)	17,7	16,77	16,45	1,47	13,04	0,32		
Смесь: дуб 60% ель 40% . . .	16,0	14,9	10,47	4,08	14,15	0,49	53,91	НАТИ

Несмотря на это, условия работы газогенератора на различных породах дерева далеко неодинаковы. Критерием для суждения о степени пригодности дерева в качестве топлива для газогенератора может служить насыпной вес топлива (табл. 4).

Таблица 4
Теплотворная способность древесины разных пород

Порода	Теплотворная способность ккал/кг	Объемный вес сухой древесины кг/м ³	Объемная теплотворная способность ккал/м ³
Дуб . . .	4857	760	3,69·10 ⁶
Береза . .	4919	650	3,20·10 ⁶
Ольха . . .	4878	540	2,64·10 ⁶
Сосна . . .	5064	520	2,63·10 ⁶
Осина . . .	4779	490	2,34·10 ⁶
Ель . . .	4857	450	2,19·10 ⁶

Совершенно очевидно, что при одном и том же объеме бункера запас топлива будет пропорционален его насыпному весу. С увеличением насыпного веса растет, следовательно, радиус действия газогенераторной машины. Выход газа из 1 кг топлива практически одинаков для всех пород древесины. В зависимости от влажности топлива он колеблется от 2 до 3 м³/кг. При одном и том же отборе газа бункер, загруженный твердой породой дерева (дуб, бук или береза), обеспечит более длительную работу.

Состояние древесного угля, получающегося в активной зоне при газификации древесины, оказывает большое влияние на течение газогенераторного процесса. Необходимо, чтобы уголь не крошился и сохранял реакционную поверхность. При газификации чурок мягких пород уголь получается достаточно крепким. Относительная прочность древесных углей различных пород, выжженных при одинаковых условиях, может быть выражена следующими цифрами:

Береза	1,00
Сосна	0,88
Осина	0,46
Ель	0,43
Пихта	0,38

Газификацию мягких пород дерева лучше производить на колосниковой решетке, так как иначе активный слой угля быстро забьется золой и угольной мелочью. Согласно исследованиям Финкбайнера эти особенности мягких пород дерева снижают мощность двигателя на 5 — 8% по сравнению с мощностью двигателей, работающих на газе из твердых пород древесины. Ввиду более быстрого выгорания древесных углей мягких пород отбор газа, по Финкбайнеру, должен быть на 20% меньше, чем при твердой древесине, что необходимо для предупреждения опускания уровня активной зоны (более подробно об этом

будет рассказано при исследовании вопроса о предельной нагрузке газогенератора).

Кроме того, при работе на древесном топливе мягких пород происходит быстрое засорение угольной мелочью очистителей газа, что сокращает вдвое, а иногда и больше периодичность чисток.

Высшая теплотворная способность древесного топлива может быть подсчитана по формуле Менделеева:

$$h_0 = 81 C + 300 H + 26 (S - O) \text{ кал/кг}, \quad (10)$$

где C, H, S и O — процентное содержание C, H_2, S и O_2 в топливе.

Для подсчета низшей теплотворной способности Менделеев дает следующее выражение:

$$h_u = 81 C + 300 H + 26 (S - O) - 6 (9 H + W) \text{ кал/кг}, \quad (11)$$

где W — относительная влажность топлива в процентах.

Кроме формулы Менделеева имеется еще несколько формул для аналитического подсчета теплотворной способности. Среди них особой известностью пользуется формула Дюлонга:

$$h_u = 81,4 C + 342 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 25 S - 6 (9 H + W) \quad (12)$$

и формула Общества германских инженеров:

$$h_u = 81 C + 290 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 25 S - 6 W. \quad (13)$$

В дальнейших расчетах будем пользоваться формулой Менделеева.

Из всех приведенных формул видно, что с увеличением влажности топлива уменьшается его низшая теплотворная способность. Это происходит потому, что увеличиваются затраты тепла на испарение гигроскопической влаги и уменьшается процентное содержание органической массы. При газификации по прямому процессу пары воды, полученные в верхней части генератора, смешиваются с газом, выходящим из активной зоны. В опрокинутом процессе пары воды проходят через восстановительный слой и реагируют с раскаленным углеродом по реакции водяного газа. Однако при газификации воздушно-сухой древесины суммарное количество химической и гигроскопической влаги всегда больше, чем это необходимо для течения реакций, расходующих воду. Избыток водяных паров переходит в генераторный газ, определяя его влажность. Таким образом, влажность топлива влияет на влажность генераторного газа, величина которой в дальнейшем зависит от степени охлаждения газа.

При газификации влажного топлива уменьшается максимальная температура в активной зоне. Это ясно из следующих

соотношений. Температура горения определяется теплотворной способностью рабочего топлива и теплоемкостью продуктов сгорания:

$$t_0 = \frac{h_{\text{раб}} + i \Sigma' mc}{\Sigma'' mc}, \quad (14)$$

где t_0 — температура горения при теоретически необходимом количестве воздуха,

$h_{\text{раб}}$ — теплотворная способность рабочего топлива, в кал/кг,

t — температура исходных продуктов (воздуха и рабочего топлива),

$\Sigma' mc$ — суммарная теплоемкость их,

$\Sigma'' mc$ — суммарная теплоемкость продуктов горения.

Но теплотворная способность рабочего топлива

$$h_{\text{раб}} = \frac{h_{\text{орг}} (100 - B)}{100} \text{ кал/кг}, \quad (15)$$

где $h_{\text{орг}}$ — теплотворная способность органической массы,

B — балласт, равный сумме $A + W$.

Таким образом, увеличение влажности влияет на температурные условия в камере газификации, определяя соотношения основных реакций генераторного процесса. Химический состав газа с увеличением влажности топлива ухудшается, что приводит к снижению мощности двигателя.

Нужно отметить, что это замечание справедливо только для топлива с высоким содержанием кислорода. Древесный уголь имеет свой оптимум влажности. Табл. 5 дает результаты опытов НАТИ по газификации березовых чурок различной влажности.

Таблица 5

Влияние влажности топлива на химический состав газа в %

Влажность в %	CO	H ₂	CH ₄	CO ₂	O ₂	N ₂	Низшая теплотворная способность газа H_u кал/м ³
12,4	21,0	16,0	3,6	10,5	0,6	49,2	1333
15,3	16,8	20,7	3,5	12,8	0,4	45,8	1343
20,0	18,0	14,4	3,6	9,0	1,0	54,0	1226
29,3	13,6	17,6	3,0	11,0	0,4	54,4	1125
37,4	9,0	9,7	3,7	16,0	0,4	61,2	839

Влияние влажности топлива на мощность двигателя по опытам Лесотехнической академии видно из табл. 6.

Таблица 6

Влияние влажности топлива на мощность двигателя

Влажность топлива в %	Эффективная мощность двигателя N_e л. с.	Влажность топлива в %	Эффективная мощность двигателя N_e л. с.
13	42	30	32
18	40	38	28
23	36		

Следовательно, повышенная влажность топлива ухудшает химический состав продуктов газификации и увеличивает их влажность. При недостаточном охлаждении газа уменьшается процентное содержание ценных для двигателя компонентов.

При выходе из газогенератора пары воды находятся в газе в перегретом состоянии. После охлаждения газа водяной пар становится насыщенным. Объемное содержание пара в газе будет:

$$\omega = \frac{Q_n}{Q_{\text{га}}}, \quad (16)$$

где $Q_{\text{га}}$ — часовой отбор сухого газа из генератора в м^3 ,
 Q_n — количество пара, поступающего в смеситель за час, в м^3 .

Обычно перед поступлением в смеситель водяной пар, содержащийся в газе, является насыщенным, поэтому отношение объемов может быть заменено отношением парциальных давлений:

$$\omega = \frac{P_s}{P - P_s}, \quad (17)$$

где P_s — парциальное давление насыщенного пара,
 P — давление влажного газа перед смесителем.

Очевидно разность $P - P_s$ равна парциальному давлению абсолютно сухого газа. Величина P всегда несколько меньше атмосферного давления за счет сопротивления, которое оказывает газогенераторная установка. Давление насыщенных паров зависит от температуры; эта зависимость, по Шюлле, дана в табл. 7.

Таблица 7
 Влияние температуры на парциальное
 давление насыщенных водяных паров

t_s	P_s кг/см ²	t_s	P_s кг/см ²	t_s	P_s кг/см ²
15	0,0174	45	0,0977	75	0,3929
20	0,0238	50	0,1258	80	0,4828
25	0,0323	55	0,1602	85	0,5895
30	0,0433	60	0,2028	90	0,7148
35	0,0573	65	0,2547	95	0,8620
40	0,0752	70	0,3175	100	1,0332

Из таблицы видно, что если генераторный газ насыщен водяными парами, то с увеличением температуры газа перед смесителем растет и парциальное давление паров воды. Следовательно, согласно уравнению (17) растет и абсолютное содержание пара в газе, поступающем в двигатель. Это влечет за собой уменьшение объема газо-воздушной смеси и падение мощности двигателя. Кривые, построенные изж. Мезиным, показывающие эту зависимость, даны на фиг. 7.

Основные реакции генераторного процесса являются гетерогенными, т. е. происходят в плоскости соприкосновения двух фаз — твердой и газообразной. В отличие от газовых гомогенных реакций, идущих во всем объеме (например сгорание рабочей смеси в цилиндре двигателя), горение твердого топлива может происходить только в месте соприкосновения топлива с воздухом. Поэтому размерность кусков газифицируемого топлива имеет большое влияние на работу генератора. От величины кусков топлива зависит удельная поверхность, т. е. общая поверхность кусков, приходящаяся на единицу насыпного объема. С увеличением активной поверхности растет скорость реакции (закон Венцеля). Эту зависимость можно выразить следующей формулой:

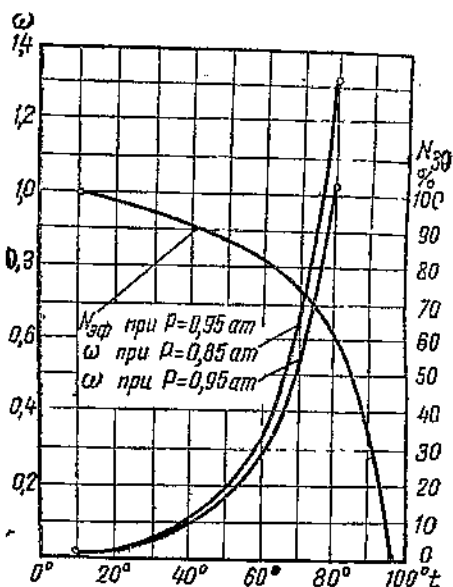
$$W = k F, \quad (18)$$

где W — скорость реакции,

F — удельная поверхность соприкосновения фаз,

k — коэффициент пропорциональности.

Если представить чурки правильной кубической формы, то можно подсчитать удельную поверхность и число чурок для различных размеров кусков топлива (табл. 8).



Фиг. 7. Влияние температуры газа на мощность двигателя.

Таблица 8

Влияние размера чурок кубической формы на удельную поверхность и другие параметры

Размер стороны чурки см	Объем одной чурки л	Поверхность одной чурки см ²	Вес чурки в кг для $\gamma = 500$ кг/м ³	Число чурок в 1 м ³ (теоретическое)	Общая поверхность чурок в 1 м ³ в м ² /м ³ (теоретическая)
3	0,027	54	0,013	37 000	200
5	0,125	150	0,062	8 000	120
8	0,512	384	0,256	1 950	75
10	1,000	600	0,500	1 000	60
15	3,370	1350	1,685	297	40

Удельная поверхность и число чурок, приходящихся на 1 м³, подсчитаны из расчета полного заполнения насыпного объема. В действительности этого никогда не бывает, и насыпной вес

Влияние размера чурок на различные параметры

Порода древесины	Размеры кусков			Объемный (или насып- ной) вес B кг/м ³	Вес одной чурки кг	Число чурок в 1 м ³	Общая по- верхность кус- ков топлива м ² /м ³
	размер см ²	поверх- ность см ²	объем чурки л				
Чурки твердой породы: $W_{абс} = 17\%$; $\gamma = 610$	5×6	62	0,030	285	0,0183	15 600	96,8
	5×20	130	0,100	290	0,0610	4 700	61,9
	8×20	184	0,160	300	0,0976	3 070	56,6
	8×28	226	0,224	345	0,1370	2 520	57,0
	16×20	328	0,360	360	0,2200	1 636	53,7
Чурки мягкой породы: $W_{абс} = 17\%$; $\gamma = 500$	8×6	92	0,048	210	0,0240	8 750	80,5
	8×28	226	0,224	240	0,1120	2 140	48,4
	16×20	328	0,360	265	0,1800	1 413	46,4
Дрова дубовые: $W_{абс} = 30\%$; $\gamma = 760$	25×40	780	1,0	572	0,76	753	58,7
	50×50	1 600	2,5	570	1,90	300	48,0
	75×50	2 250	3,75	562	2,86	197	44,3
	100×60	3 520	6,0	553	4,56	121	42,2

всегда меньше удельного. Между отдельными кусками топлива, в беспорядке насыпанными в генератор, образуется свободное пространство, величина которого зависит от размера и геометрической формы кусков.

Зная удельный и насыпной вес топлива, можно найти так называемый коэффициент свободного пространства μ :

$$\mu = 1 - \frac{B}{\gamma}, \quad (19)$$

где B — насыпной вес в кг/м³,

γ — удельный вес в кг/м³.

Действительное число чурок, приходящееся на 1 м³, будет меньше теоретического, причем

$$\frac{n_d}{n_m} = \frac{B}{\gamma}, \quad (20)$$

где n_d — действительное число чурок в 1 м³,

n_m — теоретическое число чурок (для случая $B = \gamma$).

Из табл. 8 видно, что с уменьшением размера чурок растет их число и удельная поверхность. Поэтому можно сделать вывод, что для интенсификации генераторного процесса (согласно закону Венцеля) нужно уменьшать размеры кусков топлива. Пределом такого уменьшения была бы пыль, и действительно, специальные газогенераторы, работающие на угольной пыли, имеются. Однако

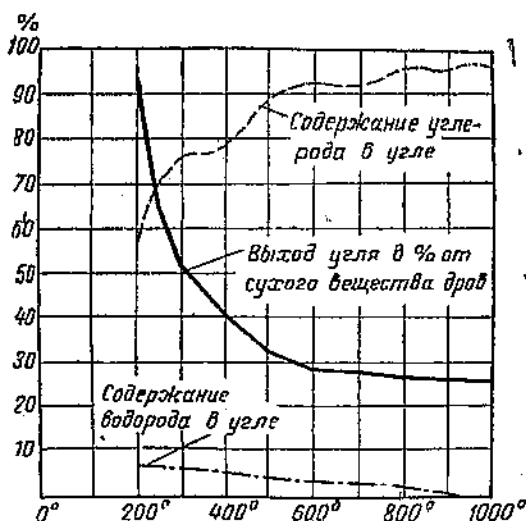
в обычных газогенераторах, в которых топливо газифицируется в слое, слишком большое размельчение кусков привело бы к вредному росту сопротивления прохождению газовых масс, отчего коэффициент наполнения двигателя уменьшился бы. Рост сопротивления слоя ставит предел размельчению кусков топлива ¹.

Для интенсификации процесса газификации существуют другие пути, о которых будет подробно рассказано в дальнейшем. Подсчитав коэффициент γ для реального топлива, можно составить таблицу, аналогичную предыдущей. Характер изменения удельной поверхности и числа чурок будет такой же, как и раньше, но абсолютное их значение согласно формуле (20) будет уменьшено на отношение $\frac{B}{\gamma}$.

Расчеты для различных пород дерева, выполненные инж. Воскресенским на основании данных Коха и Кюне, приведены в табл. 9.

2. Древесный уголь

Древесный уголь получается в результате сухой перегонки древесины. Химический состав и выход угля в процентах от веса сухих дров зависят в основном от температуры переугливания (фиг. 8). При нагревании древесины до 400° процесс сухой пере-



Фиг. 8. Содержание углерода в угле и выход угля в процентах от сухого вещества дров, в зависимости от температуры переугливания.

гонки в основном заканчивается, но с дальнейшим увеличением температуры растёт содержание С и, следовательно, повышается теплотворная способность угля. Повышение температуры переугливания влияет также на физико-химическую характеристику

¹ Другим препятствием является унос пыли из газогенератора. Ред.

топлива: изменяются механические свойства, гигроскопичность и реактивная способность угля.

Таблица 10

Влияние температуры переугливания
на химический состав угля

Температура переуглива- ния	Химический состав беззольного сухого угля в %		
	C	H	O+N
200	54,50	5,30	40,20
300	72,78	4,27	22,95
400	80,18	3,51	16,31
500	88,99	2,85	8,16
600	94,34	2,19	3,47
700	95,53	1,63	2,84
800	96,94	1,25	1,81
900	97,32	0,95	1,73
1000	97,65	0,58	1,77

С увеличением температуры сухой перегонки выход угля уменьшается за счет роста образования газообразных продуктов. Повышенная гигроскопическая влажность также способствует уменьшению выхода древесного угля. Это особенно заметно при быстром течении процесса сухой перегонки. В этом случае поверхность топлива нагревается прежде, чем успевает испариться вся влага. Соприкосновение паров воды с раскаленным углеродом вызывает реакцию водяного газа, в результате которой часть C топлива переходит в CO и CH_4 .

Химический состав продуктов сухой перегонки для различных пород дерева по исследованиям Классона дан в табл. 11.

Таблица 11

Химический состав продуктов сухой перегонки для
различных пород дерева

Продукты сухой перегонки	Содержание в %			
	сосна	ель	береза	бук
Уголь	37,83	37,81	31,8	34,97
Газы: CO_2	10,13	10,30	9,96	10,90
C_2H_4	0,23	0,20	0,19	0,20
CO	3,74	3,76	3,32	4,22
CH_4	0,59	0,62	0,54	0,47
Метиловый спирт	0,88	0,96	1,60	2,07
Ацетон	0,18	0,20	0,19	0,20
Метилацетат . . .	0,01	0,02	0,02	0,03
Уксусная кислота	3,5	3,19	7,08	6,04
Растворимые смо- лы и прочие орга- нические веще- ства	8,03	7,75	8,15	5,89
Смола	11,79	8,08	7,93	8,11
Вода	22,27	25,70	27,81	26,53
Потери	0,82	1,41	1,41	0,32

Интересно отметить, что взятые для исследования образцы топлива содержали 7—9% гигроскопической влаги, в продуктах же сухой перегонки количество влаги колеблется от 22 до 27,8%. Очевидно, большая часть воды образовалась в результате химического разложения древесины.

Большая часть продуктов сухой перегонки, получающейся в бункере газогенератора при газификации древесины, вызывает коррозию внутренней части кожуха и газопроводов. Для борьбы с этим явлением в верхнюю часть бункера иногда вставляется рубашка из тонкой листовой меди. При газификации древесного угля опасность коррозии отсутствует, и срок службы многих деталей установки поэтому возрастает.

Из табл. 11 видно, что только часть С древесины переходит в древесный уголь. Распределение С топлива между продуктами сухой перегонки показано в табл. 12.

Таблица 12
Распределение углерода топлива между
продуктами сухой перегонки

Продукты сухой перегонки	Распределение углерода в %			
	сосна	ель	береза	бук
Древесный уголь	61,3	62,1	53,5	59,0
Смола	24,1	19,9	19,2	17,1
Уксусная кислота	3,4	2,5	5,8	5,0
Оксид углерода	5,4	5,6	5,6	6,1
Углекислота . .	3,1	3,2	2,9	3,7
Остальные продукты	2,7	6,7	13,0	9,1

Температура обугливания определяет не только химические, но и физические свойства угля. С повышением температуры сухой перегонки механические качества древесного угля повышаются: растет твердость кусков; уголь при падении не разбивается, а издает характерный металлический звук; сильно возрастает сопротивление истиранию и раздавливанию. Эти качества угля очень важны, так как уменьшают потери при перевозках. Кроме того, засыпанный в газогенератор уголь не раздавливается верхним слоем топлива, обеспечивая нужное состояние восстановительной зоны. Чем меньше измельчается уголь, тем меньше унос мелких частиц топлива из генератора, а следовательно, меньше и потери от неполноты сгорания. Опыты показывают, что необходимые механические качества уголь приобретает при температуре обугливания 600—800°.

От температуры обугливания зависит также способность угля поглощать O_2 воздуха. Наибольшей поглощательной способностью обладает уголь, выжженный при 400°. При температуре выжига в 600° эта способность уменьшается в 3,5 раза. Повышенная адсорбция газа увеличивает опасность самовозгорания, влияние же ее на процесс газификации недостаточно изучено.

На основании опытов эксплуатации древесноугольных газогенераторов в настоящее время выработаны технические условия на древесный уголь как топливо для транспортных установок. Эти условия приведены в табл. 13, где в зависимости от породы древесины и качества переугливания уголь разбит на три сорта: сорт А — прочный уголь, сорт Б — средний уголь, сорт В — слабый уголь.

Таблица 13

Технические условия на различные сорта древесного угля

Наименование показателей	Размерность	Величина показателя		
		уголь сорта А	уголь сорта Б	уголь сорта В
Временное сопротивление на сжатие вдоль волокон P_1	кг/см ²	180—100	100—50	50—25
Временное сопротивление на удар вдоль волокон P_2	кг/см ²	2—1,8	1,8—1,4	1,4—0,6
Временное сопротивление на излом поперек волокон P_3	кг/см ²	18—10	10—5	5—2
Сопротивление на истирание P_4	%	70—60	60—50	50—40
Относительная влажность угля	%	15—8	15—8	15—8
Гигроскопического угля не более	%	5	7	9
Содержание летучих	%	25—7	25—7	25—7
Влагопоглощаемость, не более	%	30	40	50
Зольность, не более	%	3	3,5	4,0

Определение механических показателей, приведенных в табл. 13, производится обычным путем. Методы испытаний разработаны ЦНИИМЭ. Для испытания на сжатие и удар пользуются образцами в форме кубиков со стороной 2 см. Временное сопротивление на сжатие вычисляется по уравнению

$$P_1 = \frac{P}{F} \text{ кг/см}^2, \quad (21)$$

где P — усилие в кг в момент разрушения образца,
 F — площадь сечения образца в см².

Для испытания на удар пользуются копром

$$P_2 = \frac{Ph}{V} \text{ кг/см}^2, \quad (22)$$

где P — вес бабы копра в кг,
 h — высота падения бабы в см,
 V — объем образца в см³.

Для испытания на излом пользуются прямоугольным образцом 2×2×5 см

$$P_3 = \frac{P}{F} \text{ кг/см}^2, \quad (23)$$

где P — усилие в момент разлома образца,
 F — площадь поперечного сечения в см².

Для испытания на истирание пробу угля с размерами кусков от 25 до 50 мм загружают в барабан Деваля, который вращается со скоростью 30 об/мин. После выгрузки угля из барабана мелочь отсеивается сквозь сито с ячейками 2 мм.

$$P_1 = \left(1 - \frac{g}{G}\right) 100\%, \quad (24)$$

где g — вес мелочи, провалившейся сквозь сито,
 G — вес загруженного в барабан топлива.

Методика получения остальных параметров не нуждается в пояснении.

Способы получения древесного угля также оказывают некоторое влияние на его насыпной вес. Табл. 14 и 15 дают насыпной вес, химический состав и коэффициент свободного пространства для различных пород угля. При печном углежжении температура обугливания не превышает 500°, в то время как при кучном способе она достигает 1000°. Это создает разницу теплотворных способностей углей, полученных разными методами.

Таблица 14

Насыпной вес различных пород древесного угля

Порода угля	Удельный вес $\gamma = \text{кг/л}$	Вес 1 м ³ угля (печного)	Вес 1 м ³ угля (кучного)	$\mu = 1 - \frac{B}{\gamma \cdot 1000}$ (для кучного)
Еловый	0,215	120	127	0,400
Сосновый	0,270	137	145	0,453
Осиновый	0,276	140	147	0,470
Березовый	0,400	175	184	0,540

Таблица 15

Химический состав древесного угля различных пород

Порода и сорт угля	Процентное содержание				Низшая теплотворная способность h_n кал/кг
	С	Н	О+Н	Зола	
Березовый кучной .	88,3	2,0	7,9	1,8	7385
Сосновый	87,0	2,5	9,1	1,4	7320
Еловый	86,8	2,1	9,9	1,2	7312
Осиновый	85,92	3,43	8,56	1,25	—
Березовый печной .	78,9	3,2	16,2	1,7	6512
Сосновый	78,6	3,9	16,6	0,9	6646
Еловый	77,6	3,7	17,7	1,0	6501
Осиновый	73,04	4,74	20,97	2,09	—

3. Каменные угли и антрацит

Газификация каменных углей и антрацита транспортных газогенераторов представляет большой экономический интерес ввиду огромных запасов этих полезных ископаемых у нас, в СССР.

Около 52% топливных запасов СССР составляют каменные угли. Однако работа на каменных углях представляет известные трудности. Большое содержание золы усложняет генераторный процесс, присутствие S создает опасность разъедания деталей установки и цилиндров двигателя. Высокая температура горения каменных углей также усложняет условия эксплуатации. Для использования избытка тепла, получаемого в результате экзотермических реакций, в активную зону генератора подается вода; регулировка подачи воды может быть автоматизирована.

Классификация донецких каменных углей, имеющих особое значение для европейской части СССР, дана в табл. 16.

Таблица 16

Классификация донецких каменных углей

Наименование углей	Марка	Процентное содержание органической массы						w %	Характеристика кокса
		C	H	O+N	в том числе N	летучих веществ	S _d		
Длиннопламенный	Д	79,9	5,7	14,4	1,8	47	4,57500	7,1	Неспекующийся, порошкообразный
Газовый	Г	83,0	5,6	11,4	1,7	42	3,47850	6	Слабо спекающийся, вспученный рыхлый
Паровыжигательный	ПЖ	88,8	5,2	6,0	1,7	28	2,18350	3,5	Спекающийся, умеренно плотный
Коксовый	К	90,0	4,8	5,0	1,7	23	2,08350	3,0	Спекающийся, плотный
Паровыжигательный	ПС	91,0	4,6	4,4	1,7	17	2,58450	3,0	Спекающийся, плотный
Тощий	Т	91,7	4,3	4,0	1,7	14	2,38450	3,0	Неспекующийся, порошкообразный
Антрацит	А	96,0	2,0	2,0	—	4,5	2,78150	4,7	

В результате сухой перегонки каменных углей и антрацита остается кокс и выделяется газ, аммиачная вода и незначительное количество смолы. Отсутствие смолы в газе позволяет успешно газифицировать антрацит наравне с древесным углем по методу прямого процесса. Химический состав донецких антрацитов в зависимости от месторождения дан в табл. 17.

Из таблицы видно, что состав антрацитов одного и того же месторождения непостоянен. Вес 1 м³ каменного угля равен 800—860 кг при удельном весе 1,2—1,5. Для антрацита насыпной вес равен 800—1000 кг при удельном весе 1,4—1,8.

Температура плавления золы каменных углей в зависимости от ее состава колеблется в широких пределах. Табл. 18 дает эту зависимость для донецких углей. Испытания антрацитовых газогенераторов, проведенные в НАТИ в конце 1939 г., показали,

что работа на антраците марки АС (6 — 13 мм) при содержании в нем золы не выше 7% дает удовлетворительные результаты. Антрацит АС со средней зольностью $A^c = 10-11\%$ оказался малоприспособным топливом, так как большой выход шлака нарушал газогенераторный процесс.

Таблица 17

Химический состав донецких антрацитов

Наименование антрацита	Состав органической массы в %			Количество горючих летучих	Содержание в % от рабочего топлива			Низшая теплотворная способность H_u кал/кг
	C	H	O+N		W	A	S	
Филатовский	94,0	2,7	3,3	7,7	5,2	12,2	2,6	7040
	96,8	1,7	1,5	4,6	1,0	1,5	0,7	7715
	94,8	2,7	2,7	8,2	4,9	12,2	2,8	6800
Боково-Хрустальный	96,6	1,5	1,9	2,7	0,9	1,3	0,9	7770
	96,0	1,5	2,5	6,1	4,8	11,0	4,7	7080
	97,6	1,4	1,0	2,9	2,6	2,0	0,9	7670
Грушевский	96,0	1,7	2,3	5,1	4,4	11,7	4,7	6710
	97,2	1,5	1,8	3,9	1,6	3,2	0,7	7690

Таблица 18

Изменение температуры плавления золы в зависимости от ее состава

Главнейшие составные части золы	Плавится при 1160°	Плавится при 1350°	Плавится при 1450—1500°
SiO ₂	48,60	47,20	43,95
Al ₂ O ₃	23,34	29,58	32,05
Fe ₂ O ₃	14,68	6,96	8,45
CaO	3,08	6,52	6,00
MgO	2,88	4,66	2,07
SO ₃	6,96	3,33	1,45

4. Торф

Если в хронологической таблице топлив антрацит занимает первое место, то торф замыкает собой ряд ископаемых, занимая среднее положение между древесиной и бурым углем. Запасы торфа составляют 26% топливных ресурсов СССР. В обычном состоянии торф является многозольным и влажным топливом. Количество золы определяется месторождением торфа. Так называемый верховой торф содержит 2—5% золы, низинный — 7—12%. Есть торфяные массивы, характеризующиеся зольностью, доходящей до 30% и выше. Незначительное содержание S является положительным качеством торфа.

Табл. 19 дает содержание S для различных сортов торфа.

Таблица 19

Содержание серы в различных сортах торфа

Верховой торф		Переходный торф		Низинный торф	
пределы	среднее	пределы	среднее	пределы	среднее
0,12—0,30	0,21	0,16—0,37	0,26	0,16—0,65	0,42

При сухой перегонке торфа получают торфяной кокс и ряд продуктов, схожих с продуктами сухой перегонки древесины. Последнее обстоятельство заставляет газифицировать торф по опрокинутому процессу, так как выделяющиеся смолистые вещества, уксусная кислота, жирные карбоновые кислоты и пирогазовая смесь вредно действуют на работу двигателя и вызывают коррозию частей генератора. При опрокинутом процессе помимо освобождения от смол и кислот происходит также частичное восстановление швельгаза, состоящего на 70—80% из CO_2 .

Получаемый при сухой перегонке торфяной кокс является прекрасным топливом и отличается большим объемным весом и повышенной реакционной способностью. Насыпной вес торфяного кокса равен 350—400 кг/м³.

Помимо торфяного кокса в газогенераторах могут применяться торфяные брикеты. Сравнение этих топлив дается в табл. 20.

Таблица 20

Химический состав торфяного топлива

Название топлива	Состав рабочего топлива в %							Теплотворная способность h_a кал/кг	Объемный вес в кг/м ³
	C	H	O	S	N	W	A		
Торфяной кокс	78,5	1,6	3,8	0,2	1,4	5,0	10,0	7350	400
Торфяные брикеты . .	43,7	4,3	24,8	0,2	2,0	15,0	10,0	3850	850
Кусковой воздушно-сухой торф	36,3	3,6	20,3	0,2	1,6	30,0	8,0	3100	400

Отрицательной особенностью торфа является его склонность к крошимости. Чрезмерная крошимость торфа увеличивает механические потери топлива и сопротивление слоя прохождению газовых масс. Поэтому всевозможные шуровочные устройства и приспособления для механической подачи топлива в камеру газификации должны отсутствовать в транспортных торфяных газогенераторах.

Интересные испытания древесного газогенератора Имберт были проведены на торфе. При этом были выявлены некоторые параметры, характеризующие торф как топливо для транспортных газогенераторных установок. Зольность топлива не превышала 2%.

Повышенная крошимость торфа привела к тому, что при влажности ниже 20% количество выделившегося в очистителях конденсата было недостаточным для отделения пыли. Таким образом, обыкновенный воздушно-сухой торф мог быть применен в газогенераторах без специальной подсушки. Испытания выявили, что наиболее целесообразным размером кусков является 40—60 мм.

При испытаниях газогенератора с полной нагрузкой на двухтонном грузовике с двигателем, близким по мощности двигателю ЗИС-5 ($V_h = 3,491$ л, мощность на бензине $N_e = 68$ л.с. при $n = 3400$ об/мин), было установлено, что расход топлива составляет 65—70 кг на 100 км. Температура газа в выходном патрубке достигала при этой нагрузке 320° , а сопротивление газогенератора повышалось до 600—700 мм вод. ст.

Столь высокое сопротивление газогенератора объяснялось недостаточно прочной структурой получающегося в активной зоне торфяного кокса. Большое количество коксовой пыли быстро засоряло нижние слои топлива; затрудняя выход газа. Дальнейшие опыты показали, что размельчению кусков торфяного кокса способствует слишком интенсивное сгорание. Скорость воздуха при выходе из фурм достигает в газогенераторе Имберт 40—50 м/сек. Температура в плоскости фурм равна около 1400° . Высокая температура и скорость газового потока приводили к дроблению торфа и повышали сопротивление слоя.

Инженер Клуг, проводивший эти испытания, пишет, что благодаря увеличению диаметра воздушных фурм сопротивление газогенератора снизилось, температура в плоскости подвода воздуха уменьшилась до 1100° , образование кокса значительно улучшилось и вредное оседание сажи на поверхности газоохладителя прекратилось.

При испытании газогенератора на другом автомобиле (3,5-тонный грузовик с измененным двигателем Дизеля $N_e = 90$ л.с.) камера газификации Имберт была заменена другой с пятью фурмами диаметром в 20 мм. Испытания дали вполне удовлетворительные результаты. Генераторный газ, полученный из воздушно-сухого торфа, имел примерно следующий состав:

9,6% CO_2 , 20,8% CO , 16% H_2 , 1,7% CH_4 , 0,1% C_2H_6 ,

51,2% N_2 , $H_v = 1200$ кал/м³.

Однако значение, приписываемое немецкими исследователями скорости воздуха в фурмах, кажется сомнительным. Температура в активной зоне газогенератора, как будет доказано ниже, зависит от объемного теплового напряжения камеры (параметр $\beta = \text{кал/м}^3\text{сек}$). Скорость же воздушной струи, выходящей из фурмы, может лишь оказывать влияние на локальный разогрев отдельных кусков топлива.

Опыты, проведенные в СССР, показали, что небольших конструктивных изменений обычных древесных газогенераторов с камерой Берлие вполне достаточно для организации удовлетворительной газификации торфа с зольностью до 10% и влаж-

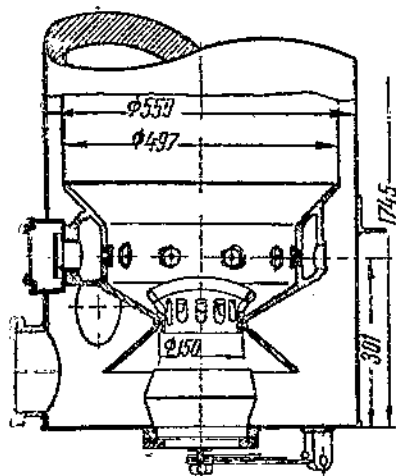
ностью до 25—30%. Конструктивные изменения газогенераторов сводятся в основном к добавлению качающейся колосниковой решетки и устройству достаточно большого зольникового пространства.

Зола торфа является легкоплавкой (табл. 19), однако изредка встречается торф с температурой плавления золы до 1500°.

Таблица 21
Температура плавления торфяной золы

Температура начала деформации		Температура размягчения		Температура жидкотекучего состояния	
пределы	среднее	пределы	среднее	пределы	среднее
800—1410	1050	990—1490	1125	1030—1410	1180

Газификацию торфа можно вести с жидким или твердым шлакоудалением. В последнем случае температура в зоне колосниковой решетки должна быть ниже температуры плавления золы. Для уменьшения температуры этой зоны необходимо понизить объемное тепловое напряжение камеры, т. е. увеличить ее объем. Это достигается изменением конфигурации топливника. Вместо камеры Берлие, представляющей собой два усеченных конуса, ставится простая цилиндрическая камера.



Фиг. 9. Приспособление конструкции капитана Ротмистрова для удаления шлака в расплавленном состоянии.

Для организации газогенераторного процесса с жидким шлакоудалением т. Ротмистровым предложена колосниковая решетка, вставляющаяся в горловину нормальной камеры Берлие (фиг. 9). Так как решетка располагается в зоне температур, значительно превышающих температуру плавления золы, то жидкий шлак стекает через отверстия решетки в специальный шлакоосборник, находящийся под раструбом камеры. Интересно отметить, что объем активной зоны при этом сильно сокращается. Высота активной зоны равна около 40—60 мм. Это указывает на скоростной характер процесса¹.

5. Бурый уголь

По содержанию С в органической массе топлива бурые угли занимают среднее положение между торфом и каменными углями. Запасы бурых углей в СССР достигают 180—190 млрд. т.

¹ Аналогичная конструкция была разработана в НАТИ в 1935 г. Опыты проводились на древесных чурках. Крекинг или сгорание смолы всегда

Месторождения бурых углей встречаются в Московской области, Сибири, на Украине, Урале, в Средней Азии и на Дальнем Востоке. Широкое распространение этого вида топлива делает его особенно ценным для транспортных газогенераторов, рентабельных, как известно, при использовании именно местных топлив. Химический состав бурых углей в зависимости от месторождения дан в табл. 22.

Химический состав бурых углей

Таблица 22

Наименование месторождения	Содержание в % по весу								H_d кал/кг
	Л ^r	C	H	O	N	J	A _c	W _p	
Подмосковный бассейн	43	69,7	4,9	18,9	1,4	5,1	26,8	32,0	6365
Уральское Челябинское	41	73,6	5,2	17,9	1,8	1,5	19,2	19,0	6820
Уральское Богословское	43	69,5	4,4	24,1	1,5	0,5	17,5	30	5990
Украинское Александрийское	66,5	66,4	5,9	21,4	0,7	5,6	29,0	55	6070
Восточно-Сибирское Чер- ноуское	41,5	75,8	5,0	18,5	18,5	0,7	8,5	32	6900
ДВК Кавдынское	41	71,5	4,2	23,0	1,2	0,1	13,1	24	6370

Несмотря на сравнительно высокую теплотворную способность органической массы, большое содержание балласта сильно снижает ценность бурых углей как топлива. Газификация их до последнего времени считалась очень затруднительной. Большое количество угольной мелочи, высокая зольность и образование шлака нарушают нормальный процесс газификации, ведение которого для большинства бурых углей усложняется выходом смолы и содержанием S.

Однако длительная эксплуатация специально переконструированных древесных газогенераторов ЗИС-21 на буром угле и большой автопробег, проведенный по маршруту Караганда—Алма Ата—Караганда, показывают, что некоторые сорта бурого угля можно хорошо газифицировать. При переводе газогенератора ЗИС-21 с древесных чурок на бурый уголь были сделаны небольшие изменения конструкции. Топливом в пробеге служил уголь Федоровского пласта (г. Караганда) с влажностью 18—20% и зольностью 8—13%.

Основные технические результаты пробега следующие. Средняя техническая скорость за весь пробег 16,1 км/час, средняя проходная выше горювины—в зоне наивысших температур. Род топлива здесь не играет роли. Ред.

часовая скорость на отдельных участках 30 — 35 км/час, максимальная скорость с нагрузкой 50 км/час, эксплуатационный расход угля 1 — 1,43 кг/км. Периодичность очистки зольника при $v_{сч} = 16$ км/час 120 — 140 км. Дальность хода на одной заправке бункера (при непрерывной работе двигателя в течение 8—10 час.) 130 — 150 км. Расход бензина на 100 км пробега — 1,3 л.

Пробег показал полную возможность устойчивого процесса газификации бурых углей и удовлетворительную работу двигателя на буроугольном генераторном газе. Однако эксплуатация газогенераторов осложняется забиванием воздушных фурм спекающимися частицами угля, присутствием S, большим уносом пыли, забиванием очистителей и другими подобными явлениями. Создание рациональной конструкции буроугольного газогенератора нужно считать поэтому еще далеко нерешенной задачей.

Интересны подсчеты, характеризующие стоимость топлива на 100 км пробега грузового автомобиля ЗИС (при полной нагрузке). Табл. 23 показывает, что бурый уголь является одним из самых дешевых топлив для транспортных газогенераторов. Это обстоятельство наряду с большой распространенностью бурых углей создает все предпосылки для возможно более скорого включения бурого угля в активный энергетический баланс автотракторного парка.

Таблица 23

Сравнение стоимости эксплуатации автомобиля ЗИС на разных топливах

Марка автомобиля	Топливо	Стоимость 1 т топлива в рублях	Расход на 100 км пробега в кг	Стоимость топлива на 100 км пробега в руб. в
ЗИС-5	Бензин	960	27	25.92
ЗИС-21	Древесные чурки	160	93	15.20
ЗИС-31	Древесный уголь	200	59	11.80
ЗИС-Г-29-А	Антрацит	43	72	3.10
ЗИС-21	Бурый уголь	18	120	1.56

6. Брикеты

Одним из недостатков древесного угля является его малый насыпной вес. Повысить объемный вес угля и его прочность можно брикетированием. Технология брикетирования состоит в следующем. Древесный уголь, выжженный при температуре около 400°, подсушивается до $W=5\%$ и размалывается в специальной мельнице, после чего пропускается через сито, имеющее от 900 до 2200 отверстий на 1 см². Полученный таким образом угольный порошок смешивается с древесным пеком в

количестве до 20%. Эта масса затем прессуется при давлении 300—800 кг/см². Отпрессованные брикеты прокаливаются при температуре 250°. С увеличением процента пека сопротивление на раздавливание повышается (табл. 24).

Таблица 24

Влияние содержания пека на сопротивление раздавливанию древесноугольного брикета

Процент пека	9,1	13,0	16,7	20
Сопротивление раздавливанию в кг/м ²	92—114	119—126	128	156

Интересным объектом для брикетирования является солома. Перевод автотракторных двигателей на этот вид местного топлива чрезвычайно расширил бы энергетическую базу транспортных газогенераторов.

Теплотворная способность соломы равна 3000 кал/кг. Зольность в зависимости от вида культуры колеблется от 3,5 до 7,5%, влажность 8—12%, однако при особо неблагоприятных условиях влажность соломы может достигать 40%.

Характеристика соломенного брикета следующая. Теплотворная способность 4500—5000 кал/кг. Зольность та же, что и у соломы, но в случае засоренности может достигать 20%. Удельный вес брикетов равен 1,0—1,4. Недостатком соломы как топлива является большое содержание и легкоплавкость золы. Температура плавления золы соломы 950—1200°, температура начала размягчения 800—850°. Основным методом газификации соломы является ведение процесса с жидким шлакоудалением, так как иначе, расплавляясь в зоне горения и затвердевая в восстановительном слое, шлак, несомненно, нарушит правильное течение газогенераторного процесса.

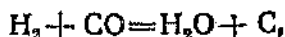
Возможны и другие способы газификации соломенных брикетов, например способ постепенного удаления из активной зоны застывшего шлака путем перемещения колосниковой решетки. Этот способ был подробно исследован в НАТИ.

III. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССА ГАЗИФИКАЦИИ

1. Условия равновесия основных реакций процесса газификации

Большинство известных в природе химических реакций обратимо, т. е. может протекать в обе стороны, причем полученные в результате начальной реакции вещества, реагируя между собой, вновь дают исходные продукты. Интересующие нас реакции восстановления также обратимы. Если привести в

соприкосновение вещества, способные реагировать между собой при данных условиях, то немедленно наступает реакция и начинают образовываться новые продукты. Реакция (например $\text{H}_2\text{O} + \text{C} = \text{CO} + \text{H}_2$) вначале протекает очень бурно, с большой скоростью. Но согласно принципам химико-динамического равновесия при соединении H_2O и C сейчас же начинается и обратная реакция



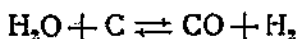
скорость которой, вначале незначительная, растет по мере увеличения количества H_2 и CO (продуктов первой реакции).

Вместе с тем падает скорость начальной реакции, и, наконец, наступает момент, когда эти скорости делаются равными.

Обе реакции принято писать вместе:



Согласно закону действующих масс скорости реакций пропорциональны произведениям концентраций реагирующих веществ. Таким образом, скорости реакций



равны при течении реакции слева направо

$$W_1 = k_1 C_{\text{H}_2\text{O}} \quad (25)$$

и при течении реакции справа налево

$$W_2 = k_2 C_{\text{CO}} C_{\text{H}_2}. \quad (26)$$

В момент наступления химико-динамического равновесия системы эти скорости делаются равными. Следовательно,

$$k_1 C_{\text{H}_2\text{O}} = k_2 C_{\text{CO}} C_{\text{H}_2},$$

откуда

$$\frac{C_{\text{CO}} C_{\text{H}_2}}{C_{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{k_1}{k_2} = K, \quad (27)$$

где k_1 и k_2 — так называемые константы скоростей реакций — некоторые постоянные коэффициенты, пропорциональные скоростям реакций и имеющие связь с химическим сродством. Величина K называется константой равновесия и также характеризует сродство реагирующих веществ. Величина K остается без изменения только при постоянной температуре, поэтому соотношение (27), выражающее закон действующих масс, называется также изотермой реакции.

Если написать выражение бимолекулярной реакции в общем виде



а концентрации реагирующих веществ соответственно обозна-

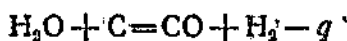
чить через C_a , C_b , C_c и C_d , то уравнение изотермы перепишется следующим образом:

$$\frac{C_a C_b}{C_c C_d} = \frac{k_1}{k_2} = K_c. \quad (28)$$

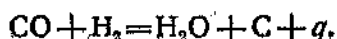
Если реакция происходит между газообразными веществами, концентрации могут быть заменены величинами, им пропорциональными, т. е. парциальными давлениями. В этом случае уравнение (28) перепишется так:

$$\frac{P_a P_b}{P_c P_d} = \frac{k_1}{k_2} = K_p. \quad (29)$$

При подсчете константы равновесия обычно придерживаются следующего правила. Уравнение химической реакции пишут таким образом, чтобы положительный тепловой эффект был расположен с правой стороны. Концентрации исходных веществ помещают в числитель, а концентрации конечных продуктов реакции составляют знаменатель дроби. Например реакция водяного газа



при подсчете константы должна быть написана так:



Тогда CO и H_2 будут исходными, а H_2O и C — конечными продуктами реакции, константа будет соответствовать уравнению (27).

Уравнение изотермы реакции можно вывести также термодинамическим путем. Зависимость между константой равновесия и температурой дается уравнением Вант-Гоффа, которое может быть получено из изотермы реакции. Уравнение Вант-Гоффа имеет большое значение при изучении химической кинетики:

$$\frac{d \ln k}{dT} = \frac{q}{RT^2}, \quad (30)$$

где k — константа равновесия,

T — температура процесса,

q — тепловой эффект реакции,

R — газовая постоянная.

Подставляя значение $R = 1,986$ и переходя от натуральных логарифмов к десятичным, можно получить уравнение (30) в более удобной форме:

$$\frac{d \lg k}{dT} = \frac{q}{4,574 \cdot T^2}. \quad (31)$$

Из формулы видно, что чем больше тепловой эффект реакции, тем больше зависимость константы равновесия от температуры.

Если реакция экзотермична и величина q положительна, то

$$\frac{d \ln k}{dT} < 0,$$

и, следовательно, константа равновесия растет с увеличением температуры.

(В случае эндотермической реакции

$$\frac{d \ln k}{dT} < 0,$$

и константа равновесия уменьшается с увеличением температуры.

Если $q=0$, то константа от температуры не зависит. Из уравнения (28) видно, что рост константы равновесия означает увеличение концентрации исходных веществ; наоборот, уменьшение константы показывает увеличение концентрации конечных продуктов реакции.

Сам Вант-Гофф сформулировал это следующими словами: „Каждое равновесие между двумя материальными системами при падении температуры перемещается в направлении той системы, образование которой связано с выделением теплоты“.

Правило Вант-Гоффа заключает в себе идею о некоторой присущей веществу способности приспособляться к внешним воздействиям. Немного позднее этот принцип был распространен не только на термическое воздействие, но и на прочие изменения, которым может подвергнуться химическая система. Ле-Шателье, сделав это обобщение, формулировал его следующим образом: „Под влиянием внешнего воздействия равновесная система изменяется в направлении противодействия этому воздействию“.

Это значит, что повышение температуры вызовет в системе реакции, идущие с поглощением тепла, т. е. эндотермические; понижение температуры вызовет обратное явление — рост экзотермических реакций. Понижение давления вызывает реакции, идущие с увеличением объема. Увеличение концентрации реагирующих веществ способствует по закону действующих масс увеличению скорости реакций между ними, т. е. вызовет процесс, уменьшающий их концентрацию в смеси.

Иллюстрацию этого обобщения, известного под названием принципа Ле-Шателье, можно было бы продолжать до бесконечности. Применяя принцип Ле-Шателье, можно предугадать направление процесса и произвести правильный выбор параметров, влияющих на интересующую нас систему. Являясь следствием второго закона термодинамики, принцип Ле-Шателье не имеет, однако, самостоятельного значения. Поэтому попытки обобщить его и применять в качестве основного закона природы, как бы заманчивы они ни были, всегда приведут к теоретическим ошибкам.

2. Современные теории горения углерода

Процесс горения С, как и всякую гетерогенную реакцию, можно разбить на два основных этапа — подвод газообразных компонентов реакции к поверхности топлива и химическое взаимодействие С топлива с O_2 воздуха. При подаче воздуха

к газифицируемому топливу у поверхности кусков образуется газовая пленка, так называемый пограничный слой, скорость которого равна нулю. Проникновение воздуха сквозь эту пленку возможно лишь при помощи диффузии, скорость которой определяется законом Фика:

$$dn = -Dg \frac{dc}{dx} \cdot dz, \quad (32)$$

где dn — количество вещества, продиффундировавшего за время dz на площади g через пленку толщиной dx и при разности концентраций dc ,

D — коэффициент диффузии в $\text{см}^2/\text{сек}$.

Коэффициент диффузии пропорционален абсолютной температуре в степени 1,7—2 и обратно пропорционален квадратному корню из молекулярного веса диффундирующего вещества:

$$D = k \cdot \frac{T^{1,7-2}}{\sqrt{m}}, \quad (33)$$

где k — коэффициент пропорциональности,
 m — молекулярный вес вещества.

Толщина пленки зависит от скорости газового потока и уменьшается с увеличением ее. При определении толщины пограничного слоя, влияющей на скорость процесса диффузии, большое значение имеет также характер движения газового потока. Согласно работам Рейнольдса, исследовавшего движение жидкостей по трубам, существует критическая скорость, при которой ламинарное (струйчатое) движение переходит в турбулентное (вихревое).

При турбулентном движении пограничный слой получается значительно тоньше; кроме того, благодаря интенсивному перемешиванию струй растет коэффициент теплопередачи. Переход от ламинарного движения к турбулентному происходит скачком и характеризуется критическим значением особого безразмерного параметра, названного числом Рейнольдса:

$$Re = \frac{wl}{\nu} = 2320, \quad (34)$$

где Re — число Рейнольдса,

w — скорость потока в $\text{м}/\text{сек}$,

l — линейный размер трубы в м ,

ν — кинематическая вязкость, равная μ/ρ ;

μ — коэффициент вязкости,

ρ — плотность; ρ в свою очередь равно отношению γ/g ,

γ — удельный вес,

g — ускорение силы тяжести.

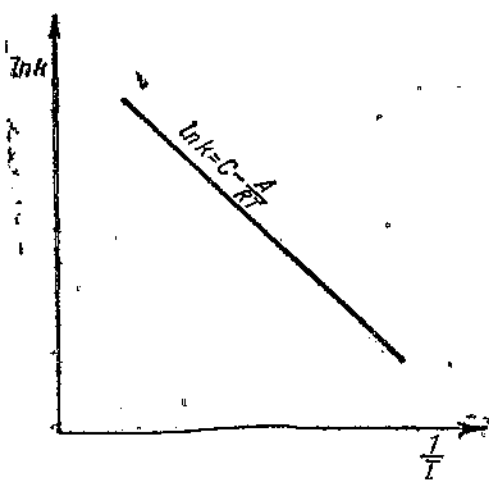
Скорость химической гетерогенной реакции, как и скорость диффузии, зависит от концентрации реагентов, площади соприкосновения фаз и температуры; но последняя зависимость

сказывается в значительно большей степени. Интегрируя уравнения Вант-Гоффа (30), можно получить так называемое уравнение Аррениуса, дающее зависимость, указанную на фиг. 10:

$$\ln k = C - \frac{A}{RT}, \quad (35)$$

здесь k — константа скорости реакции,
 C — константа интегрирования,
 A — энергия активации,
 R — газовая постоянная,
 T — абсолютная температура.

С увеличением температуры на 10% скорость большинства реакций возрастает в 2—3 раза. При протекании любого гетерогенного процесса и, в частности, при горении С можно представить два основных случая. При низких давлениях и температурах скорость химической реакции на поверхности топлива меньше скорости диффузии. В этом случае суммарная скорость процесса будет определяться скоростью химической реакции, точно так же как суммарное сопротивление любой цепи, составленной из нескольких различных звеньев, определяется звеном, имеющим максимальное сопротивление.



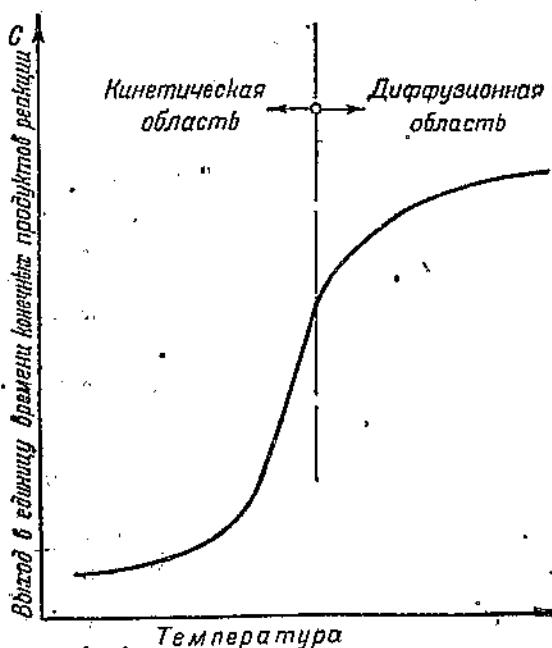
Фиг. 10. Влияние температуры на скорость реакции.

Область, в которой скорость химической реакции меньше скорости диффузии, называется кинетической областью. Суммарная (макроскопическая) скорость процесса горения, идущая в кинетической области, зависит от тех же параметров, что и скорость химической реакции.

С увеличением температуры скорость химической реакции растет значительно быстрее скорости диффузии. При определенной для каждой химической системы температуре скорость химической реакции становится больше скорости диффузии, и процесс переходит в диффузионную область. Теперь уже скорость диффузии определяет суммарную скорость процесса. Специфические особенности химической реакции не могут влиять на скорость процесса в диффузионной области. Зато решающее значение приобретают физические параметры. Скорость газового потока, размерность и конфигурация кусков топлива влияют на выход продуктов газификации. Так как скорость диффузии зависит от температуры в меньшей степени, чем скорость химической реакции, то и кривая, показывающая зависи-

мость выхода конечных продуктов реакции в единицу времени от температуры $C=f(t)$, при переходе из кинетической области в диффузионную меняет свой характер.

Кривая (фиг. 11), которую можно назвать интегральной, свойственна всем гетерогенным реакциям и отражает связь физических и химических факторов, влияющих на скорость.



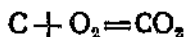
Фиг. 11. Зависимость скорости гетерогенной реакции от температуры.

протекания процесса. Несмотря на ясность общей картины взаимодействия физико-химических факторов в процессе горения C , вопрос о природе первичных продуктов реакции остался нерешенным до наших дней. Многочисленные гипотезы о механизме горения C можно разбить на несколько основных теорий.

Редукционная теория

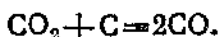
В 1851 г., исследуя реакцию горения C , Барресвиль нашел, что при низких температурах основным продуктом реакции является CO_2 . Опыты Ланга с продуванием воздуха сквозь стеклянную трубку, наполненную ретортным углем, также показали, что при температуре 500° и малых скоростях воздуха единственным продуктом реакции является CO_2 . Взгляды Барресвиля, Ланга, Смита и других ученых были поддержаны такими авторитетами, как Менделеев и Габер, и на долгие годы определили развитие теории процесса горения. Согласно редукционной теории строение активной зоны соответствует

описанию схем, приведенных в первой главе этой книги. В плоскости подвода воздуха идет реакция



и организуется зона горения.

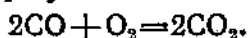
Продолжая дальше через слой раскаленного топлива, CO_2 восстанавливается по реакции



Таким образом, по редукиционной теории активная зона четко делится на две зоны — горения и восстановления.

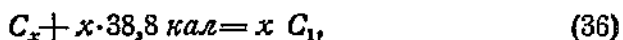
Первичная теория

Вскоре после опытов Барресвиля Теннер и Бэлл высказали противоположную точку зрения, согласно которой первичным продуктом горения C является CO . Таким образом, CO_2 может получиться только в результате гомогенной газовой реакции



Эта концепция, поддержанная и развитая Ауфгейзером, была несомненным шагом вперед, так как учитывала физические факторы, игнорируемые редукиционной теорией. Ряд фактов, известных из эксплуатационной практики, не укладывался в рамки старой редукиционной теории. Например анализ проб газа, взятых Бэллом непосредственно у фурм доменной печи, дал следующие результаты: 0,76% CO_2 , 37,6% CO , 61,64% N_2 . Полученное соотношение $CO:CO_2$ не могло быть объяснено на основании воззрений Барресвиля и его сторонников. Работа так называемых скоростных газогенераторов, не имеющих, как известно, восстановительной зоны, также требует новых представлений о механизме горения C . Поэтому в настоящее время редукиционная теория имеет только историческое значение.

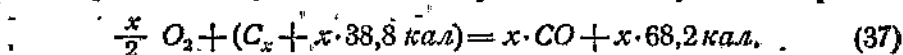
Сгорание C , по Ауфгейзеру, происходит следующим образом. Молекула C является многоатомной. В состоянии накала в присутствии O_2 или простого кислородного соединения (H_2O , CO_2) происходит эндотермическое расщепление комплексной молекулы с выделением активного углеродного атома C_1 , который и является „истинным“ C . Таким образом реакции сгорания предшествует эндотермический процесс:



т. е. на каждый грамматом истинного C затрачивается 38,8 кал. То обстоятельство, что реакционная способность активного C одинакова к O_2 , CO_2 и H_2O , является, по Ауфгейзеру, доказательством того, что „вначале становится деятельным атом O_2 , а это равнозначно образованию CO “.

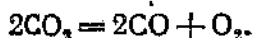
Необходимо отметить, что предположение об одинаковой реакционной способности активного C к H_2 , CO_2 и H_2O дальнейшими исследованиями не подтвердилось.

Первичное образование СО протекает следующим образом:



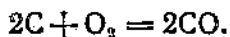
Примером горения „истинного“ С является горение циана (CN)₂. Циан горит ярким пламенем, четко разделенным на две зоны: внутреннюю красную и наружную — узкую, голубую. Во внутренней зоне происходит образование СО, которая и горит во внешней зоне характерным голубым пламенем.

В пользу первичной теории говорит известное в физической химии правило Оствальда. Согласно этому правилу наиболее устойчивая при данных условиях система появляется не сразу, а проходит через ряд ступеней. Вначале появляется наименее устойчивая модификация, обладающая наибольшим запасом энергии, которая переходит через ряд все более и более устойчивых форм. Образование СО в условиях избытка воздуха является формой чрезвычайно неустойчивой и, таким образом, согласно правилу Оствальда, соответствует действительности. Сгорание С в СО является реакцией необратимой, в то время как СО₂ при высоких температурах диссоциирует по реакции



Таким образом, отмечает Ауфгейзер, существование СО₂ при высоких температурах горения вообще невозможно.

Строение активной зоны с точки зрения первичной теории представляется в следующем виде. В плоскости подвода воздуха идет горение С с образованием первичных продуктов:

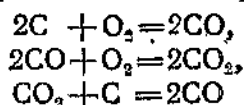


Благодаря избытку О₂ образовавшаяся СО сгорает в СО₂, чем и вызвана большая концентрация СО₂ в зоне горения. По мере удаления от фурм концентрация свободного О₂ уменьшается. Избыточного О₂ становится меньше, в то время как скорость горения С остается прежней, поэтому концентрация СО растет.

Роль реакции восстановления СО₂ в увеличении концентрации СО относительно невелика, так как понижение температуры в „восстановительном поясе“ мало способствует течению эндотермических реакций. Переход зоны горения в зону восстановления по первичной теории должен происходить постепенно. Графическое изображение отношения СО к СО₂ по высоте активной зоны дало бы плавную кривую.

Если с количественной стороны совершенно безразлично, в результате каких процессов получают окислы С, то качественное значение новой теории чрезвычайно велико. В самом деле, технический смысл газогенераторного процесса заключается в получении продуктов неполного сгорания и, в частности, в получении СО. Согласно редуccionной теории организация процесса горения не представляет никаких трудностей, поэтому все усилия конструкторов легких газогенераторов всегда были

направлены на обеспечение дальнейших восстановительных реакций. Но скорость реакции $\text{CO}_2 + \text{C} = 2\text{CO}$ лимитировала минимальную высоту активной зоны и ставила предел уменьшению габаритов камеры газификации. В цепи реакций



последние два звена для газогенераторного процесса являются совершенно лишними

Если бы удалось оборвать процесс после первой же реакции, газогенератор мог бы работать без восстановительной зоны. В этом и заключается идея высокоскоростной газификации, которая в дальнейшем будет разобрана подробно.

Теория комплекса

Огромный экспериментальный материал, накопившийся за десятки лет исследований процессов горения, хорошо укладывается в „комплексную“ теорию горения, завоевавшую в последние годы большое число сторонников. По этой теории, впервые предложенной Ридом и Уилером в 1912 г., в результате взаимодействия O_2 и C на поверхности топлива образуется твердый углекислородный комплекс, распадающийся в дальнейшем на CO и CO_2 . Отношение последних зависит от температуры, давления и целого ряда факторов, представляющих физико-химические особенности топлива.

Нагревая древесный уголь до 900° в условиях вакуума, а затем охлаждая его до $200-400^\circ$ и подвергая действию воздуха, Рид и Уилер наблюдали частичное поглощение O_2 воздуха древесным углем. Для обратного введения поглощенного O_2 одного вакуума оказалось недостаточно. Только совместное действие вакуума и нагревание до 900° приводило к выделению большей части поглощенного газа в виде CO и CO_2 . Этот эксперимент и послужил основанием для предположения о существовании углекислородного комплекса, являющегося сложным физико-химическим соединением. Некоторые исследователи, приняв теорию образования комплекса, дальнейшее развитие процесса горения представляли себе по-разному. Так, по Лэнгмюру, при взаимодействии C с O_2 образуется CO_2 , которая в соединении с C дает комплекс и CO . Реакция по Лэнгмюру идет следующим образом:

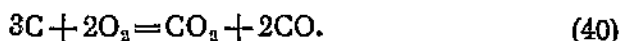


Теория Лэнгмюра и обширные опыты Крейзингера (фиг. 14) показали влияние на ряд ученых, воспринявших новые взгляды на механизм горения C в духе старой редуccionной теории. По Хасламу, углекислородный комплекс распадается на CO_2 , и CO может получиться лишь в результате восстановительных реакций.

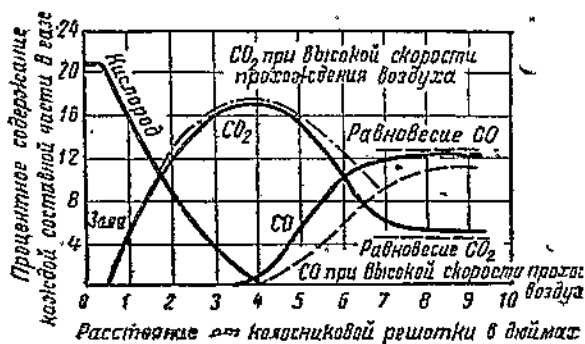
Исследования Л. Мейера показали, что до 1200° в результате горения С получается СО и CO_2 в эквимолекулярных количествах. Этот процесс может быть представлен следующим суммарным уравнением



Повышение температуры до 1600° уменьшает отношение $\text{CO}:\text{CO}_2$ до 0,5, что может быть объяснено течением реакции



Многочисленные экспериментальные данные, подобные опытам Крейзингера, долгое время считались вескими доказательствами в пользу редуccionной теории. В самом деле, тщательный анализ газа, сделанный по высоте слоя (фиг. 12), показывал резкое уменьшение концентрации O_2 и увеличение CO_2 . Достигнув максимума, на некотором расстоянии от колосниковой решетки содержание CO_2 начинает постепенно уменьшаться. Максимум кривой CO_2 соответствует появлению и дальнейшему увеличению концентрации СО. Характер полученных Крейзингером кривых легко объяснялся редуccionной теорией.

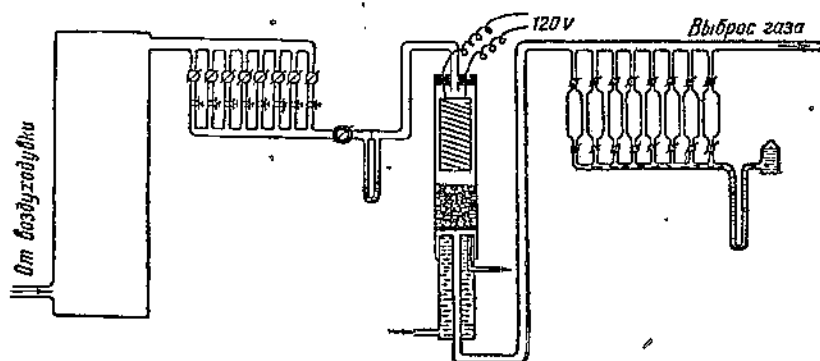


Фиг. 12. Опыты Крейзингера.

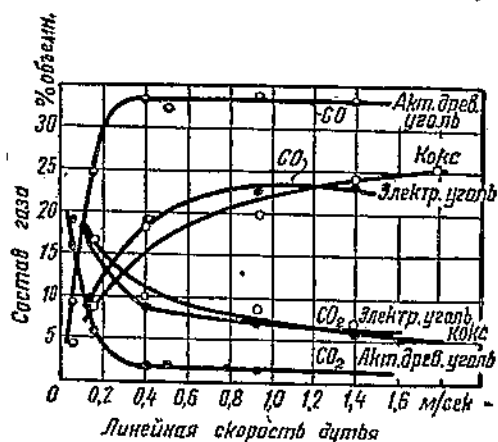
Опыты, проведенные Гродзовским и Чухановым в Институте азота, а позднее — Колодцевым в Теплотехническом институте, неожиданно привели к другим результатам.

В кварцевые трубки диаметром 20 и 80 мм на решетку насыпался древесный уголь слоем около 100 мм. После предварительного разогрева верхнего слоя топлива подавался воздух и производилась газификация по схеме опрокинутого процесса (фиг. 13). Опыты показали, что с увеличением скорости воздуха отношение $\text{CO}:\text{CO}_2$ растет, причем содержание СО достигает максимума при скорости дутья около 0,5 м/сек (считая на свободное сечение и холодное дутьё). Газификация различных пород топлива дала одну и ту же картину изменения концентрации окислов С в зависимости от скорости воздуха (фиг. 14).

Наиболее интенсивный рост содержания СО наблюдался в сравнительно небольшом интервале скоростей дутья (до 0,5 м/сек). При дальнейшем увеличении скорости воздуха режим газификации оставался постоянным. Исследование показало, что

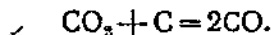


Фиг. 13. Схема опыта по исследованию горения угля в слое.



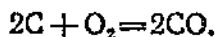
Фиг. 14. Сравнительный ход газообразования для древесного угля и кокса.

процесс образования газа заканчивался в слое толщиной в 3—4 см, и, таким образом, время контакта газовых масс с топливом не превышало в некоторых случаях 0,001 сек. Совершенно очевидно, что полученное количество СО (около 30 %) не могло быть обеспечено течением реакции восстановления:

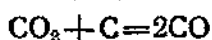


Выход СО обеспечивался, по Гродзовскому и Чуханову, первичными реакциями, протекание которых напоминало схему, принятую Л. Мейером. Увеличение температуры слоя, концентрации кислорода и скорости дутья уменьшали высоту активной зоны.

При температурах выше 800° заметную роль начинает играть реакция „горения“:



Скорость этой реакции чрезвычайно высока. При скоростях дутья, приближающихся к скорости звука, выход СО не прекращался, так что практический предел интенсификации этой реакции не был получен. Поэтому скорость процесса горения лимитируется исключительно физическими факторами, т. е. диффузией O_2 к поверхности топлива и гидродинамической характеристикой газового потока. При большой скорости потока вынос первичных продуктов реакции из кислородной зоны обеспечивается полностью и роль вторичных процессов



сводится к минимуму.

3. Основные реакции газогенераторного процесса

В результате взаимодействия топлива с воздухом в активной зоне получается генераторный газ, представляющий механическую смесь нескольких газов. В зависимости от сорта газифицируемого топлива, от влажности и крупности химический состав газа колеблется. Большое влияние на качество газа оказывает также способ ведения процесса и режим газогенератора. В табл. 25 даны средние составы газа, полученного из различных топлив.

Таблица 25

Средний состав генераторного газа, полученного из различных топлив

Тип газо-генератора	Топливо	Состава газа в %						H_u кал/м ³
		CO	H ₂	CH ₄	O ₂	CO ₂	N ₂	
Берлие	Древесные чурки	19,5	16,3	2,5	1,7	9,8	50,2	1224
Кромаг	То же	20,7	18,6	1,7	—	10,5	48,5	1249
ЦНИИВ	Швырок	17	9,25	4,3	0,2	11,0	58,25	1132
ГОДГ	Щепы	22	16,5	1,4	—	13,0	47,1	1214
НАТИ Г-21	Древесный уголь	28,7	4,6	1,8	—	2,5	62,3	1142
НАТИ Г-21	Антрацит	27,8	4,5	1,3	—	2,5	63,7	1070
НАТИ Г-23	Древесноугольные брикеты	19,3	6,8	2,0	0,1	7,7	64,1	930
У-6	Древесный уголь	28,6	2,1	2,3	0,5	5,2	61,3	1118

Из табл. 25 видно, что генераторный газ состоит в основном из шести компонентов, которые можно разбить на две группы, активную (CO, CH₄, H₂ и O₂) и пассивную (CO₂ и N₂). В табл. 26 дана сводка основных параметров составляющих генераторного газа.

Параметры компонентов генераторного газа

Компоненты Параметры	CO	H ₂	CH ₄	O ₂	CO ₂	N ₂
Молекулярный вес	28	2	16	32	44	28
Количество кислорода, необходи- мого для полного сжигания 1 м ³ .	0,5	0,5	2,0	—	—	—
Теоретически необходимое количе- ство воздуха для сжигания 1 м ³	2,38	2,38	9,52	—	—	—
Высшая теплотворная способность 1 м ³ газа при 0° и 760 мм рт. ст.	3035	3050	9530	—	—	—
Низшая теплотворная способность H ₂ кал/кг при 0° и 760 мм рт. ст.	3035	2570	8570	—	—	—

Зная теплотворные способности основных компонентов генераторного газа и приняв теплотворную способность C равной 8100 кал/кг, что соответствует средним экспериментальным данным, можно рассчитать тепловой эффект большинства интересующих нас реакций.

Для примера произведем расчет теплового эффекта экзотермической реакции образования метана:



Химические уравнения представляют собой не только выражения закона сохранения вещества, но и отвечают закону сохранения энергии. Поэтому обеим частям любого химического равенства должно соответствовать не только одинаковое количество вещества, но и одни и те же запасы химической и тепловой энергии. Если считать, что уравнение написано для одного моля C , то теплотворная способность вступающего в реакцию C будет:

$$8100 \cdot 12 = 97\,200 \text{ кал},$$

где 12 — молекулярный вес C .

Теплотворная способность двух молей H_2 равна

$$2570 \cdot 22,4 \cdot 2 = 115\,136 \text{ кал}.$$

Теплотворная способность одного моля CH_4 , полученного в результате реакции, равна

$$8570 \cdot 22,4 = 191\,968 \text{ кал},$$

где 22,4 м³ — объем моля при нормальных физических условиях.

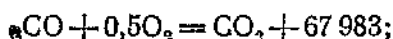
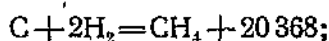
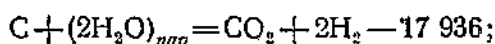
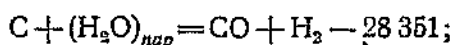
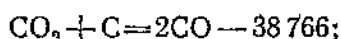
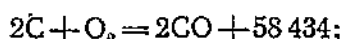
Подставляя в формулу образования CH_4 соответствующие тепловые эффекты, получим уравнение с одним неизвестным:

$$97\,200 + 115\,136 = 191\,968 + q,$$

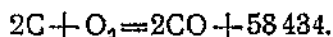
решая которое, получим тепловой эффект реакции:

$$q = 20\,368 \text{ кал.}$$

Подсчитанные таким образом основные уравнения газогенераторного процесса имеют следующие тепловые эффекты (в кал/моль):



Разберем некоторые из приведенных реакций более подробно.



Современные воззрения на механизм образования окислов С были подробно разобраны ранее. В духе комплексной теории, как это было указано выше, он может соответствовать следующей схеме.

При действии O_2 на реакционную поверхность топлива образуется углекислородный комплекс CO , который в дальнейшем распадается на CO и CO_2 . Отношение $CO : CO_2$ при прочих равных условиях зависит от температуры процесса. С увеличением температуры концентрация CO растет, что вполне согласуется с правилом Ле-Шателье.

Кроме того, из двух возможных реакций образования окислов С пойдет, очевидно, та, химическое сродство которой больше. Согласно законам физической химии химическое сродство пропорционально свободной энергии или максимальной работе реакции.

Максимальная работа химической реакции в к.д.м

$$A = RT \cdot \ln K, \quad (42)$$

где $\ln K$ — логарифм константы равновесия;

остальные обозначения — те же.

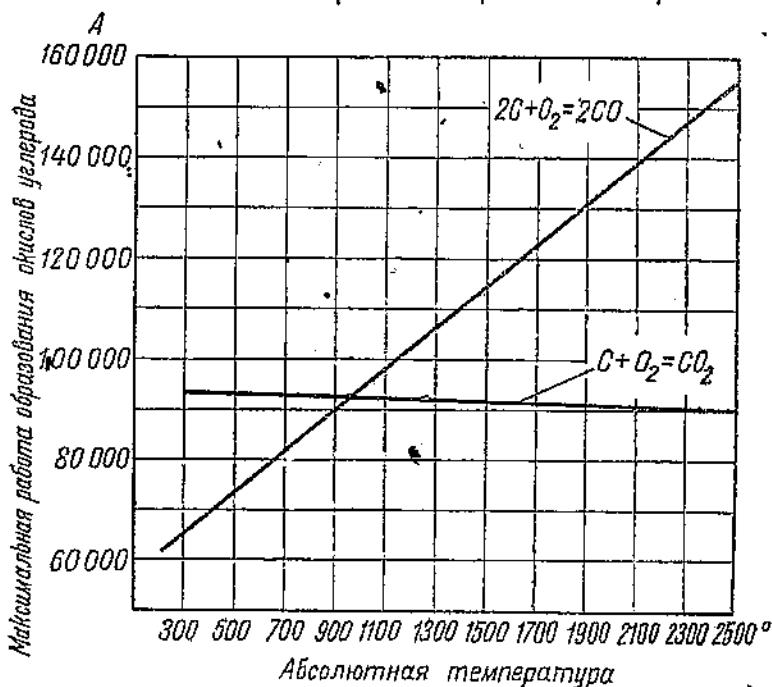
Зависимость максимальной работы для обеих реакций от температуры дана в табл. 27 и на фиг. 15.

Из таблицы видно, что с увеличением температуры максимальная работа реакции образования CO становится больше работы полного сгорания C . Следовательно, при высоких темпе-

Таблица 27

Максимальная работа реакций образования окислов углерода в зависимости от температуры

Реакция Т°К	$\text{C} + \text{O}_2 = \text{CO}_2$	$2\text{C} + \text{O}_2 = 2\text{CO}$
298	94 011	64 764
500	93 838	73 312
1000	93 371	94 537
1500	92 912	115 343
2000	92 430	135 636
2500	91 332	154 407



Фиг. 15. Максимальная работа реакций образования окислов углерода в зависимости от температуры.

ратурах распад комплекса будет происходить при больших отношениях $\text{CO} : \text{CO}_2$. С увеличением скорости потока растет скорость диффузии O_2 через газовую пленку, окружающую поверхность топлива.

С увеличением скорости выноса продуктов сгорания уменьшается роль вторичных реакций сгорания окислов С и восстановления CO_2 и отпадает необходимость в восстановительной зоне.

Реакции восстановления CO_2 посвящено большое число исследований, так как с точки зрения редукционной теории она занимает центральное место в газогенераторном процессе.

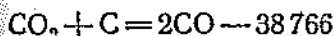
Константа равновесия этой реакции

$$K = \frac{C_{\text{CO}}^2}{C_{\text{CO}_2}} \quad (43)$$

и ее зависимость от температуры подробно изучались Будуаром.

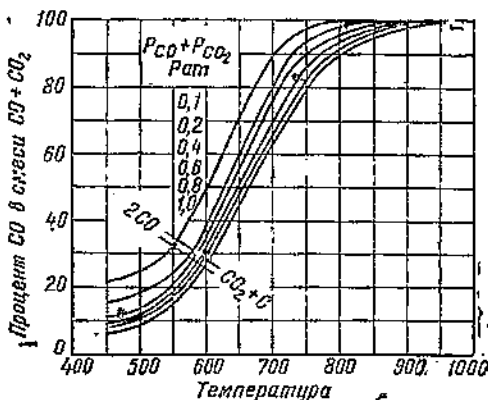
Над раскаленным С пропускалась CO_2 или смесь CO_2 с N_2 . Контакт газа с углеродом топлива длился до тех пор, пока не наступало химическое равновесие, после чего анализом устанавливалось количество восстановленной CO_2 .

Реакция



эндотермична и идет с увеличением объема. Следовательно, согласно принципу Ле-Шателье повышение температуры и уменьшение давления будет способствовать увеличению выхода CO (фиг. 16).

Зависимость константы равновесия от температуры по опытам Будуара дана в табл. 28. Результаты, полученные при пропускании над С чистой CO_2 , даны в табл. 29.



Фиг. 16. Изобары равновесия реакции $\text{CO}_2 + \text{C} = 2\text{CO}$.

Таблица 28

Результаты опытов Будуара

t°	Объемный состав газа в %			Константа равновесия $K = \frac{(\text{CO})^2}{\text{CO}_2}$
	CO_2	CO	N_2	
400	20,6	0,9	78,5	0,00039
500	17,1	6,4	76,5	0,02396
600	10,1	18,1	71,8	0,3241
700	3,1	29,4	67,5	2,789
800	0,6	33,7	65,7	18,94

Из кривой Будуара и из приведенных таблиц видно, что константа равновесия растет с увеличением температуры. Кривая фиг. 16 позволяет сделать ряд практических выводов.

Таблица 29

Результаты опытов по восстановлению CO_2

t°	Состав газовой фазы при равновесии, найденный из опыта, в %		Состав газовой фазы, определенной по уравнению Будуара, в %	
	CO	CO_2	CO	CO_2
445	0,6	99,4	—	—
550	10,7	89,3	11,0	89,0
650	39,0	61,0	39,0	61,0
800	93,0	7,0	90,0	10,0
925	96,0	4,0	97,0	3,0

При температурах, близких к 1000° , смещение равновесия в сторону образования CO достигает таких пределов, что дальнейшее повышение температуры не является необходимым. При газификации воздухом содержание CO по отношению к CO_2 увеличивается, так как присутствие N_2 уменьшает парциальное давление реагирующих веществ. Азот, таким образом, оказывает действие, подобное вакууму.

Реакция Будуара $\text{CO}_2 + \text{C} = 2\text{CO}$ пойдет в восстановительном поясе активной зоны, если газогенератор будет работать на редукионном режиме. Редукионный режим генератора соответствует таким скоростям газа в слое топлива, при которых образовавшаяся на поверхности топлива CO не успевает выйти из активной зоны и сгорает в CO_2 по реакции



В этом случае, естественно, возникает необходимость в дальнейших восстановительных реакциях, и толщина восстановительного слоя лимитирует минимальные габариты камеры газификации.

Уравнение, по которому Будуар произвел аналитический расчет количества восстановленной CO_2 , является упрощенным уравнением Вант-Гоффа:

$$\frac{d \ln k}{dT} = \frac{q}{RT^2};$$

отсюда

$$\ln k = \frac{q}{R} \int \frac{dT}{T^2};$$

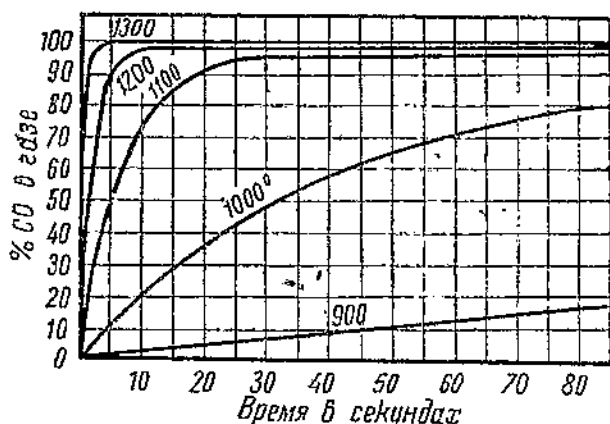
$$\ln k + \frac{q}{RT} - C = 0, \quad (44)$$

где C — константа интегрирования.

Считая тепловой эффект реакции не зависящим от температуры и равным 42 000 кал, определив C путем двух подстановок опытных данных, равных 21,4, и считая $R \approx 2$, окончательно получим:

$$\ln k + \frac{21\,000}{T} - 21,4 = 0. \quad (45)$$

Необходимо отметить, что опыты Будуара и других ученых, исследовавших влияние различных параметров на величину констант равновесия, не соответствуют условиям, определяющим



Фиг. 17. Результаты исследований реакций $\text{CO}_2 + \text{C} = 2\text{CO}$.

течение реального газогенераторного процесса. В действительном процессе химические равновесия не успевают наступить, так как время контакта между газом и топливом чрезвычайно мало. Опыты Клементя и Адамса, исследовавших влияние времени контакта, температуры и вида топлива на количество восстановленной CO_2 , даны на фиг. 17—19.

Из фиг. 17 видно, что скорость восстановления CO_2 в сильной степени зависит от температуры. Так, при 900° после 20-секундного контакта содержание CO в газе достигает только 5%. То же время контакта, но при температуре 1000° увеличивает содержание CO до 40%. При температуре 1100°, соответствующей температуре восстановительной зоны, тот же контакт дает 90% CO, но 5-секундный контакт обеспечивает всего лишь 50% восстановленных продуктов горения. Однако при том же времени контакта количество восстановленной CO_2 зависит от состояния реакционной поверхности (фиг. 18).

Интересно отметить связь между результатами исследований Будуара и реакциями образования окислов углерода.

Константа равновесия реакции $\text{C} + \text{O}_2 = \text{CO}_2$ равняется

$$K_1 = \frac{P_{\text{O}_2}}{P_{\text{CO}_2}}, \quad (46)$$

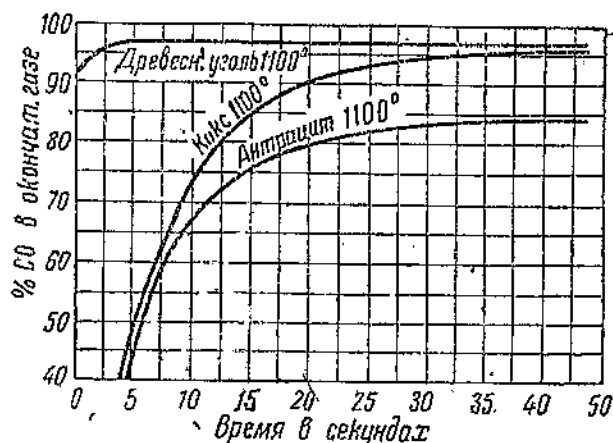
где P_{O_2} и P_{CO_2} — парциальные давления.

Константа реакции $2C + O_2 = 2CO$ соответственно равна

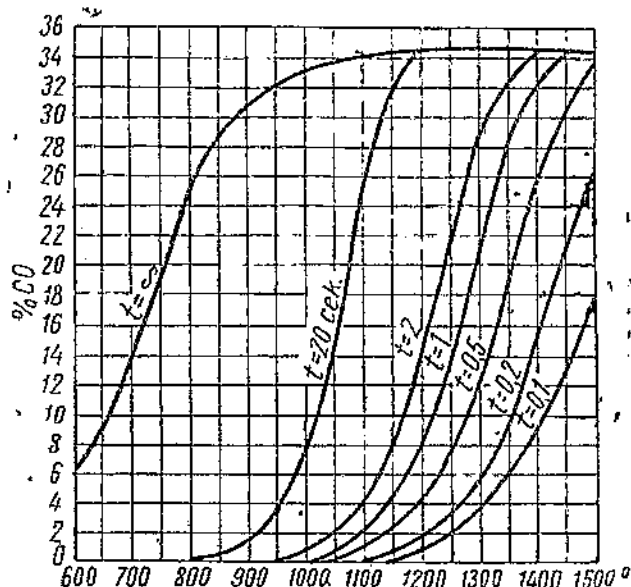
$$K_2 = \frac{P_{O_2}}{(P_{CO})^2} \quad (47)$$

Отношение полученных констант равновесий, как это легко видеть, дает константу Будуара:

$$K = \frac{K_1}{K_2} = \frac{(P_{CO})^2}{P_{CO_2}} \quad (48)$$



Фиг. 18. Результаты исследований, проведенных Клементом, Адамсом и Хаскинсом.



Фиг. 19. Результаты исследований, проведенных Клементом, Адамсом и Хаскинсом.

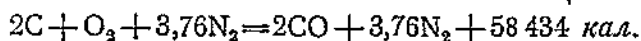
Таким образом кривую Будуара можно рассматривать как интегральную кривую горения С (фиг. 11), показывающую зависимость выхода конечных продуктов реакции от температуры. Согласно комплексной теории горения нижняя кинетическая часть кривой будет соответствовать условиям образования CO_2 (низкие температуры), а переход в диффузионную область дает высокий процент CO при условии быстрого выноса продуктов газификации из топливной зоны.

Однако определение приближенно и имеет иллюстративный характер, так как кривая Будуара характеризует состав газовой фазы в состоянии установившегося химического равновесия без учета потребного на то времени. Во втором случае имеет место сочетание двух совместно действующих процессов диффузии и скорости химической реакции, причем третий фактор — время — является для них общим. Кривая Будуара будет близка к интегральной кривой лишь в области низких температур, где выход конечных продуктов лимитируется скоростью химической реакции, а влияние диффузии становится второстепенным.

При газификации чистого С сухим воздухом образуется так называемый воздушный газ.

Рассмотренные выше реакции образования окислов С дают возможность проанализировать этот процесс. В идеальном случае весь С должен перейти в CO , причем для подсчета термического к. п. д. процесса газификации совершенно безразлично, как была получена CO в результате непосредственного сгорания С, в духе первичной теории или путем восстановления образовавшейся ранее CO_2 . Это положение соответствует закону Гесса, по которому тепловой эффект реакций определяется результатами процесса и не зависит от промежуточных реакций.

При пропускании воздуха через раскаленный слой топлива С газифицируется по реакции



Таким образом, в результате затраты двух молей С в идеальном воздушном процессе получается 5,76 молей газа, состоящего из N_2 и CO .

Процентный состав продуктов газификации может быть легко подсчитан:

$$\text{CO} = \frac{2 \cdot 100}{5,76} = 34,7\%;$$

$$\text{N}_2 = \frac{3,76 \cdot 100}{5,76} = 65,3\%.$$

Выход газа из 1 кг С

$$E = \frac{5,76 \cdot 22,4}{2 \cdot 12} = 5,38 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

Теплотворная способность полученного газа

$$H_z = 3035 \cdot 0,347 = 1053 \text{ кал/м}^3.$$

К. п. д. воздушного процесса может быть подсчитан по следующей формуле:

$$\eta_z = \frac{EH_a}{h_u}, \quad (49)$$

где η_z — к. п. д. процесса газификации,

h_u — теплотворная способность топлива в кал/кг .

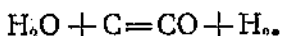
Подставив в формулу (49) соответствующие величины, получим:

$$\eta_z = \frac{5,38 \cdot 1053}{8100} = 0,7.$$

Таким образом, в идеальном воздушном процессе теряется 30% теплотворной способности топлива (к. п. д. реального воздушного процесса, конечно, значительно ниже, так как часть C сгорает в CO_2).

Неиспользованное тепло тратится на лучеиспускание стенок камер газификации и на повышение температуры газа, выходящего из генератора. Такое распределение избыточного тепла нерационально, так как требует дополнительных мероприятий по охлаждению газа и ставит материал стенок камеры в тяжелые условия работы при высокой температуре.

Наиболее рентабельным является расход избыточного тепла на ведение эндотермической реакции водяного газа:



Помимо понижения температур выходящих продуктов газификации и уменьшения потерь на лучеиспускание добавкой воды достигается повышение теплотворной способности газа и увеличение к. п. д. процесса. Теплотворная способность рабочей смеси воздуха с газом, полученная в паро-воздушном процессе, будет также несколько выше. Последнее обстоятельство без подробного анализа может показаться неясным. В самом деле, ведь низшая теплотворная способность CO равна 3035 кал/м^3 , H_2 — только 2570 кал/м^3 . Следовательно, теплотворная способность рабочей смеси CO с теоретическим количеством воздуха (коэффициент избытка воздуха $\alpha=1$) будет (табл. 26):

$$H_g = \frac{3035}{1+2,38} = 900 \text{ кал/м}^3.$$

Теплотворная способность водородно-воздушной смеси соответственно

$$H_g = \frac{2570}{1+2,38} = 760 \text{ кал/м}^3.$$

Однако этот расчет был бы правилен в случае газификации углерода чистым O_2 . Действительный процесс газификации протекает в воздухе. Расчет показывает, что в этом случае каждому молю CO соответствует 1,88 моля N_2 , оставшиеся от первичного воздуха. Поэтому при расчете рабочей смеси CO

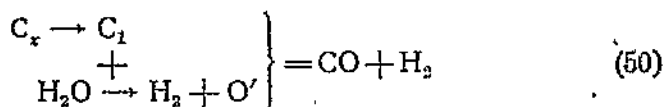
с воздухом необходимо учесть объем и балластного N_2 , составляющего вместе с CO идеальный воздушный газ.

Тогда

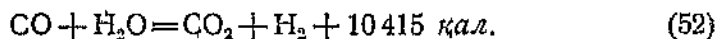
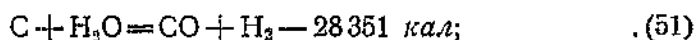
$$H_g = \frac{3035}{1 + 1,88 + 2,38} = \frac{3035}{5,26} = 576 \text{ кал/м}^3.$$

Реакция водяного газа

Роль водяного пара в газогенераторном процессе чрезвычайно велика. Газифицируемое топливо никогда не бывает абсолютно сухим или лишенным водородных соединений, поэтому гигроскопическая и химическая влага являются постоянными компонентами процессов, идущих в активной зоне. Согласно первичной теории водяной пар под действием раскаленного C диссоциирует на H_2 и активный O' , который образует CO по схеме

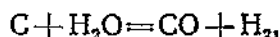


Исследования механизма реакции водяного газа, не законченные полностью и в настоящее время, были начаты еще Лавуазье в 1783 г. Автор большой работы о водяном газе Дольх принимает схему, предложенную в 1858 г. Фервером. Согласно Дольху

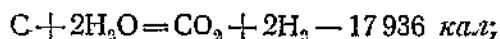


Образовавшаяся в результате контакта водяного пара и раскаленного углерода CO , взаимодействуя с избытком паров воды, дает CO_2 и H_2 .

Габер, Клемент и Адамс и другие исследователи, также считая первичной реакцией процесс



дальнейшее течение процесса представляют по-разному, вводя в рассмотрение дополнительные реакции:



Константа равновесия реакции (52)

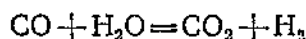
$$K = \frac{CO \cdot H_2O}{CO_2 \cdot H_2} \quad (53)$$

Реакция (52) относится к числу вторичных реакций газогенераторного процесса. Равновесие (53) устанавливается не непосредственно между продуктами, полученными на реактивной

поверхности топлива и С, а между газообразными компонентами первичных реакций. Описанное равновесие встречается на практике, в шахтных печах, где образовавшаяся над поясом горения СО приходит в соприкосновение с парами воды, вдуваемыми вместе с воздухом или получившимися в результате испарения гигроскопической влаги топлива.

Проф. Доброхотов, исследуя работу в стационарных газогенераторах, принимает величину константы равновесия реакции водяного газа равной для нормального режима $K=1,7-2,5$. Это положение он принимает за основу своего теплового расчета и называет „первым основным законом генераторного процесса“. Согласно Доброхотову чем меньше время пребывания топлива в генераторе (чем больше напряжение зеркала горения), тем больше растет величина K , приближаясь к максимуму $K=2,5$.

Рост величины K с увеличением температуры вполне объясним с точки зрения принципа Ле-Шателье. Реакция



экзотермична и поэтому ее равновесие при повышении температуры должно сдвигаться в сторону образования исходных продуктов. Интересно, что мы приходим к тому же выводу, если рассмотрим величину K как коэффициент, характеризующий и суммирующий результаты целой цепи химических взаимодействий.

С повышением температуры увеличивается выход СО и H_2 по реакции



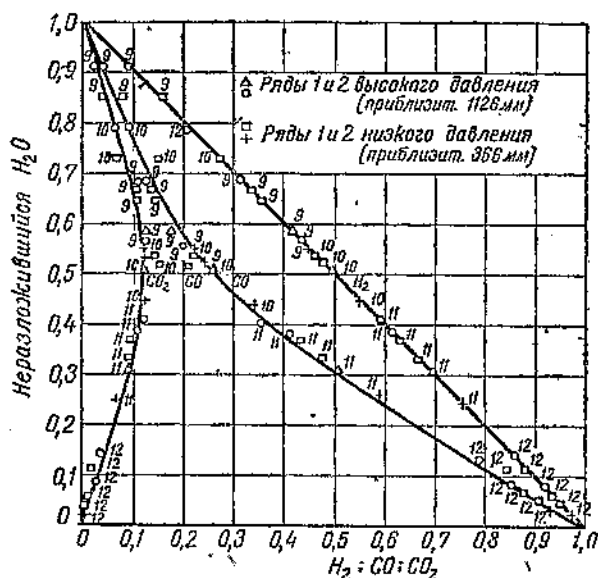
растет отношение смеси $\frac{\text{CO}}{\text{CO}_2}$, получающейся вследствие распада углекислородного комплекса. Кроме того, интенсивность реакции водяного газа повышает количество разложившихся паров воды. Следовательно, отношение концентрации веществ, определяющих собой константу (53), должно увеличиться. Следующая таблица дает результаты опытов Гана по определению влияния температуры на константу равновесия реакции водяного газа.

Таблица 30

Опыты Гана по определению компоненты равновесия реакции водяного газа

t°	$K = \frac{\text{CO} \cdot \text{H}_2\text{O}}{\text{CO}_2 \cdot \text{H}_2}$	K (определена аналитически)	Процентное содержание, отвечающее равновесию, найденному из опыта			
			CO ₂	CO	H ₂	H ₂ O
687	0,53	0,70	49,3	18,7	13,3	18,7
786	0,84	5,86	42,3	22,1	13,5	22,1
886	1,20	1,19	11,6	23,8	40,8	23,8
986	1,67	1,55	22,0	21,4	22,0	34,5
1005	1,62	1,62	—	—	—	—
1086	1,95	1,91	20,6	35,6	20,8	35,6
1205	2,13	2,33	21,4	29,6	19,4	29,6
1405	2,49	2,96	28,5	29,5	12,5	29,5

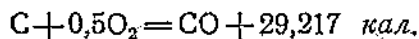
Количество разложившейся влаги сильно влияет на отношение $\frac{CO}{CO_2}$, что соответствует выводам теории Ауфгейзера (фиг. 20). Однако характер кривой на фиг. 20 можно объяснить, не применяя первичной теории, а рассматривая газогенераторный процесс в целом, как это уже было сделано при анализе правила Доброхотова.



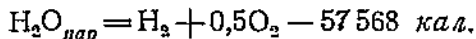
Фиг. 20. Объем образующихся CO_2 , CO и H_2 на единицу объема двудного пара.

Количество разложившихся паров воды зависит от вида газифицируемого топлива, времени контакта и температуры. Результаты опытов Клемента, Адамса и Хеслама даны на фиг. 21.

Расчет количества вводимой в процесс газификации воды можно произвести следующим образом. При горении C в CO выделяется тепло: -



Разложение воды идет по эндотермической реакции



Таким образом, за счет сгорания 1 кг-моля C можно разложить

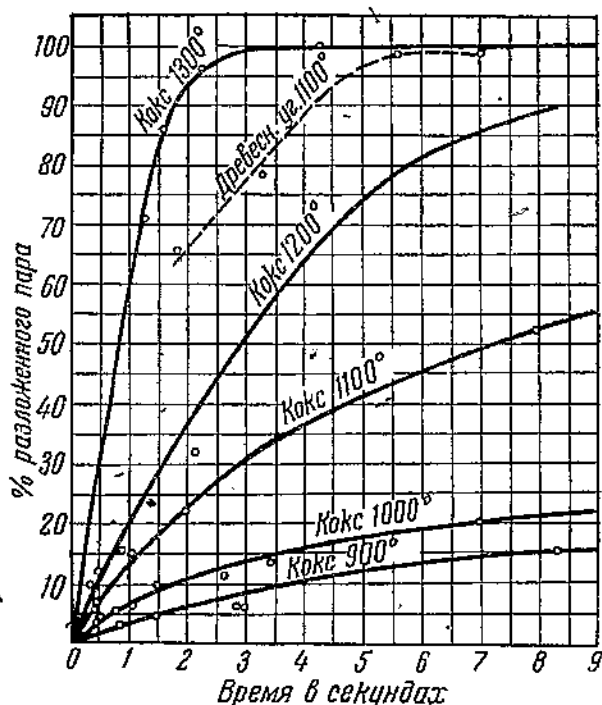
$$\frac{29\,217}{57\,568} = 0,51 \text{ кг-моля воды;}$$

в переводе на килограммы это составит

$$0,51 \cdot 18 \approx 9,2 \text{ кг.}$$

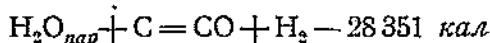
Если считать, что в топливе содержится около 80% С, то количество воды, которую можно ввести в газогенератор на 1 кг топлива, будет

$$\frac{0,51 \cdot 18}{12} \cdot 0,8 \approx 0,61 \text{ кг/кг.}$$



Фиг. 21. Зависимость разложения водяного пара коксом и древесным углем от температуры и продолжительности соприкосновения.

Полученный теоретический результат примерно совпадает с практическим расходом воды при газификации древесного угля и антрацита. К этому же выводу можно прийти при рассмотрении других реакций. При течении реакции



расходуется 28 351 кал/кг воды.

Следовательно, теплоты сгорания 1 кг-моля С в СО хватило бы для разложения

$$\frac{29\,217}{28\,351} = 1,03 \text{ кг-моля воды.}$$

Но при разложении 1 кг-моля воды по реакции, водяного газа расходуется 2 кг-моля С; одна при сгорании в СО по реакции $\text{C} + 0,5\text{O}_2 = \text{CO}$, создающей необходимый приход тепла,

другая — по реакции водяного газа. Поэтому полученное количество воды должно быть отнесено к 2 кг-молям С и расчет даст тот же результат:

$$\frac{1,03 \cdot 18}{2 \cdot 12} \cdot 0,8 = 0,61 \text{ кг/кг.}$$

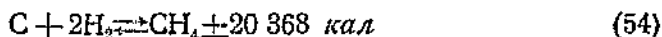
При газификации древесных чурок количество воды, необходимое для 1 кг топлива, снижается до 0,38 кг, и его с избытком хватает за счет гигроскопической и химической влаги. При газификации древесных и каменных углей собственной влажности топлива может нехватить, и тогда процесс ведется с подводом недостающей воды.

Реакция образования метана

Разбирая реакции, идущие в активной зоне, мы совершенно не затрагивали условий, при которых получается CH_4 . При газификации древесного угля содержание метана в генераторном газе обычно невелико и колеблется от 0,5 до 1,5%. При газификации дров содержание CH_4 доходит до 3,5 — 4,5% и растет пропорционально влажности топлива.

Метан образуется в зоне сухой перегонки, т. е. в слоях топлива, лежащих в бункере генератора¹. В табл. 11 указан химический состав продуктов сухой перегонки для разных пород дерева. Средний состав древесного газа, получающегося при сухой перегонке, следующий: 57,1% CO_2 ; 32,7% CO ; 8,4% CH_4 ; 1,8% C_2H_4 .

Равновесие реакции



было исследовано Мейером и Альтмейером (табл. 31).

Таблица 31

Опыты Майера и Альтмейера — равновесие реакции $\text{C} + 2\text{H}_2 = \text{CH}_4$

t°	Вычисленный состав газа в %		t°	Вычисленный состав газа в %	
	CH_4	H_2		CH_4	H_2
300	98,79	1,21	800	4,41	95,59
400	86,16	13,84	850	1,59	98,41
500	62,53	37,47	1000	0,5	99,5
600	31,68	68,32	1100	0,2	99,8
700	11,07	88,93			

Реакция (54) идет с большим выделением тепла и уменьшением объема. Следовательно, согласно принципу Ле-Шателье понижение температуры и повышение давления должны сдвигать равновесие вправо, т. е. в сторону образования CH_4 .

¹ При пониженном отборе газа из генератора количество CH_4 несколько возрастает по мере удаления газа от фурм. Ред.

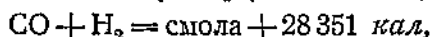
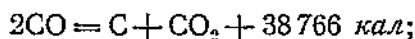
Таким образом, все факторы, так или иначе влияющие на понижение температуры процесса газификации, должны влиять на увеличение содержания CH_4 . И действительно, на практике большой процент CH_4 указывает на „холодный“ ход генератора. Понижение напряжения колосниковой решетки, увеличение влажности топлива, слишком высокий бункер и отдаленность зоны сухой перегонки от зоны горения, — все это факторы, благоприятно действующие на увеличение количества CH_4 в верхних слоях топлива.

Если считать, что единственным источником образования CH_4 является процесс сухой перегонки, то чем меньше высота активной зоны и чем больше расстояние от плоскости горения до верхнего слоя топлива, тем больше CH_4 получится в генераторе. Но если присутствие CH_4 легко объяснимо при прямом процессе, то при опрокинутом процессе, в котором продукты сухой перегонки проходят через активную зону, требуется более тщательный разбор происходящих явлений. В самом деле, проходя через слой раскаленного угля, CH_4 должен разложиться, таким образом его содержание снизится до минимума или же вообще будет равно нулю. Опыты показали, что реакция



т. е. распад CH_4 на его составляющие происходит чрезвычайно медленно.

При сухой перегонке каменного угля, осуществляемой при 1000° , создаются условия, чрезвычайно благоприятствующие образованию H_2 . Однако CH_4 не успевает разложиться полностью, и его присутствие в газе всегда значительно выше, чем это можно ожидать из условий равновесия. Таким образом, можно предположить, что часть CH_4 , имеющегося в газе, есть результат того, что время распада CH_4 больше времени пребывания продуктов сухой перегонки в активной зоне. При выходе генераторного газа из слоя топлива при соответствующих температурных условиях (около 700°) начинается течение обратных реакций:



несколько ухудшающих химический состав газа (табл. 32), содержание же CH_4 при этом почти не меняется.

Таблица 32

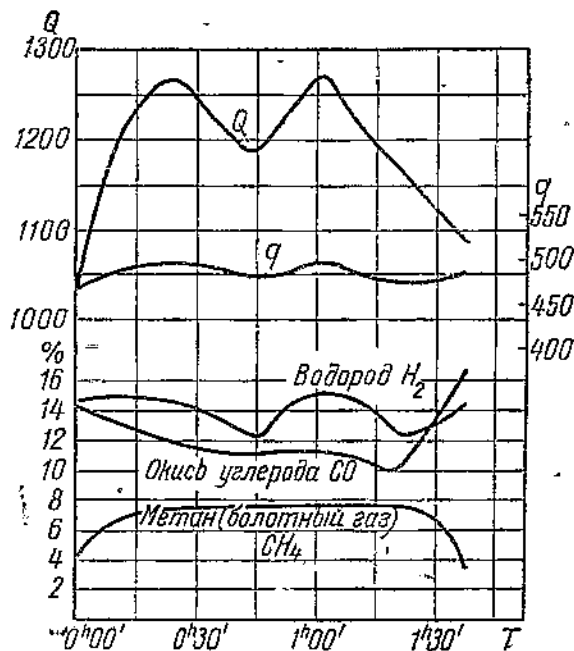
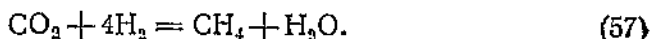
Изменение состава газа при выходе из слоя топлива

Проба газа взята	CO_2	CO	H_2	CH_4	H_2O	N_2	Темпе- ратура °C	H_u кал/м³
540 мм от решетки	8,95	29,0	12,13	0,77	3,72	50,43	760	1202
При выходе из слоя	6,17	22,49	10,41	0,74	7,88	52,31	480	1015

Слой топлива или же часть объема зольника с температурой 700—750° называют поэтому „вредным пространством“. Чтобы избежать течения обратных реакций, лучше всего быстро охладить газ, выходящий из активной зоны, до 400—450°. Это быстрое охлаждение называется „закалкой“ газа и должно быть предусмотрено при конструировании генератора¹. Образование CH_4 может произойти также в результате взаимодействия между продуктами газификации в слое топлива. С приближением газа к колосниковой решетке (в опрокинутом процессе) растет концентрация CO и H_2 . Между этими компонентами газа могут произойти следующие реакции:



Кроме того, может быть реакция



Фиг. 22. Изменение объемного состава газа по времени.

Таким образом, в этом случае за счет увеличения количества CH_4 падает концентрация CO и H_2 . Так как эти реакции идут с

¹ Практика эксплуатации и лабораторные испытания транспортных газогенераторов не установили заметного влияния „вредного пространства“ на так называемую „закалку“ газа. Увеличение же объема нижней части газогенератора (при опрокинутом горении) весьма желательно с точки зрения уменьшения уноса угольной мелочи из газогенератора. Ред.

выделением тепла, то с повышением температуры их равновесие сдвигается влево. Следовательно, образование CH_4 по этим реакциям может начаться лишь в зонах низких температур.

Следует отметить удивительную стабильность содержания CH_4 в газе. В то время как содержание других компонентов во время испытания газогенераторов сильно колеблется, количество CH_4 остается почти неизменным (фиг. 22).

Это можно объяснить слабой подвижностью реакции разложения CH_4 . Метан может образоваться в генераторе вследствие распада тяжелых углеводородов. В зоне сухой перегонки при газификации дерева выделяется смола. Опыты Фишера показали, что смола, полученная путем медленного и умеренного нагрева топлива (примерно при 500°), обладает целым рядом специфических особенностей, приближающих ее к нефти. Частичный крекинг этой смолы в камере газификации также может быть источником тяжелых углеводородов и CH_4 в газе.

IV. ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ГАЗОГЕНЕРАТОРА

Существующие методы теплового расчета стационарных газогенераторов, работающих по прямому процессу, не годятся для расчета транспортных установок. При газификации по прямому процессу генераторный газ является результатом смешения продуктов всех зон. Задаваясь составом топлива и долями расхода углерода на различные компоненты газа, в результате расчета получают химический состав газа. Тепловой баланс между экзотермическими реакциями на колосниках и реакцией водяного газа в зоне восстановления определяет количество вводимого пара при заданной температуре на колосниковой решетке.

В легком газогенераторе, работающем по опрокинутому процессу, продукты сухой перегонки проходят через активную зону. Процесс горения и частичного крекинга смол и тяжелых углеводородов почти не изучен, поэтому аналитическое определение состава газа в данном случае чрезвычайно затруднено. Тепловой расчет легкого газогенератора был предложен и подробно разработан в НАТИ И. С. Мезиным в 1931 г. В основу были положены материальный и энергетический балансы исходных и конечных продуктов газификации, т. е. законы сохранения материи и энергии. Ниже приводится этот расчет с некоторым математическим упрощением.

На основании имеющегося экспериментального материала известны примерные составы генераторного газа для различных видов топлива.

Задавшись химическими составами топлива и газа, можно определить, какому из трех основных компонентов газогенераторного процесса (топливу, воздуху или гигроскопической влаги) газ обязан присутствием того или иного элемента. На основании такого расчета составляют материальный и тепловой балансы процесса газификации, дающие возможность в дальнейшем произвести и конструктивный расчет агрегата. Для

Большей ясности весь тепловой расчет разбит нами на ряд пунктов соответственно количеству разбираемых в нем вопросов. Весь расчет проведен на 100 кг-молей сухого генераторного газа. Такой метод, как будет видно из дальнейшего, вносит целый ряд математических упрощений.

1. Состав газа

Для теплового расчета газогенератора, работающего с опростым горением, как уже было сказано, задаются составами топлива и газа.

Генераторный газ состоит в основном из шести элементов: CO , CH_4 , H_2 , O_2 , CO_2 , N_2 .

При расчете на 100 кг-молей количество объемных процентов будет равно числу кг-молей данного компонента. Первые четыре компонента представляют активную часть генераторного газа, остальные два представляют пассивную часть, не участвующую в горении, имеющую место в цилиндре двигателя. Отношение горючих элементов газа ко всему газу может служить характеристикой качества газа:

$$\lambda = \frac{CO + H_2 + CH_4}{100}, \quad (58)$$

где λ — коэффициент доброкачественности газа, CO , H_2 и CH_4 — количество кг-молей соответствующих элементов.

Выбор состава газа определяет его низшую теплотворную способность:

$$H_u = 30,35 CO + 25,7 H_2 + 85,7 CH_4 \text{ кал/м}^3. \quad (59)$$

Эта формула (табл. 26) дает теплотворную способность газа при 0° и 760 мм вод. ст.

Цифровые коэффициенты в этой формуле не что иное, как тепловые эффекты горения соответствующих газов; CO , H_2 и CH_4 представляют, как и в большинстве других формул, не химические обозначения, а процентное содержание данных элементов в газе.

Зная молекулярный вес компонентов газа, легко определить вес 100 кг-молей сухого генераторного газа:

$$G_{газ} = 28CO + 44CO_2 + 32O_2 + 2H_2 + 16CH_4 + 28N_2. \quad (60)$$

Очевидно, что если 1 моль CO весит 28 кг, то CO молей будут весить 28 CO кг и т. д.

Удельный вес генераторного газа выбранного состава будет получен делением веса газа на его объем:

$$\lambda = \frac{G_{газ}}{2240} \text{ кг/м}^3, \quad (61)$$

где 2240 — объем 100 кг-молей при нормальных физических условиях (0° и 760 рт. ст.) в м³.

2. Подсчет средней теплоемкости продуктов газификации

Одним из результатов теплового расчета генератора является определение температуры газа, выходящего из камеры газификации. Для определения этой температуры, имеющей большое значение для ориентировочного расчета охлаждающих поверхностей очистительных устройств, необходимо знать среднюю теплоемкость продуктов газификации. Молекулярная теплоемкость отдельных компонентов газа может быть подсчитана по следующим формулам: для двухатомных газов (H₂, O₂, CO и N₂)

$$mC_p^{ds.-at} = 6,83 + 0,0006 t. \quad (62)$$

Авторы этой формулы — Маллар и Ле-Шателье. Для CO₂ может быть использована формула Лангена и Шредера, дающая до 1000° хороший результат:

$$mC_p^{CO_2} = 8,7 + 0,0026 t. \quad (63)$$

Для CH₄ имеется формула академика Павлова:

$$mC_p^{CH_4} = 9,78 + 0,006 t. \quad (64)$$

В сухом генераторном газе, на 100 кг-молей которого ведется данный расчет, отсутствуют пары воды. В результате реального процесса газификации газ почти всегда содержит пары воды, количество которых зависит от влажности топлива и режима процесса газификации. Теплоемкость паров воды может быть подсчитана по формуле Хольборна и Шилля, которая до 1500° дает значения, совпадающие с результатами расчетов наиболее точных соотношений:

$$mC_p^{H_2O} = 8,24 + 0,000832 t. \quad (65)$$

Средняя теплоемкость смеси газов, какой являются продукты газификации, равна сумме произведений молекулярных теплоемкостей на объемные доли газа:

$$(mC_p)_{cp} = W^{ds.-at} mC_p^{ds.-at} + W^{CO_2} mC_p^{CO_2} + W^{CH_4} mC_p^{CH_4} + W^{H_2O} mC_p^{H_2O}. \quad (66)$$

Так как состав задан для сухого генераторного газа, то для газа, содержащего пары воды, необходимо сделать пересчет:

$$W^{ds.-at} = \frac{H_2 + O_2 + CO + N_2}{100 + H_2O}. \quad (67)$$

Здесь H₂, O₂, CO, N₂ — процентное содержание этих газов в сухой смеси;

H₂O — количество молей паров воды, приходящихся на 100 кг-молей сухого генераторного газа.

Аналогичный пересчет делается и для CH_4 , CO_2 и H_2O :

$$W^{\text{CO}_2} = \frac{\text{CO}_2}{100 + \text{H}_2\text{O}}; \quad (68)$$

$$W^{\text{CH}_4} = \frac{\text{CH}_4}{100 + \text{H}_2\text{O}}; \quad (69)$$

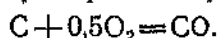
$$W^{\text{H}_2\text{O}} = \frac{\text{H}_2\text{O}}{100 + \text{H}_2\text{O}}. \quad (70)$$

Естественно, что после пересчета сумма объемных долей должна быть равна единице, т. е.

$$W^{\text{дв.-ат}} + W^{\text{CO}_2} + W^{\text{CH}_4} + W^{\text{H}_2\text{O}} = 1.$$

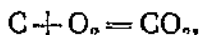
3. Подсчет элементарного состава газа

Для составления материального баланса необходимо подсчитать, из какого количества элементов состоит 100 кг-молей сухого генераторного газа заданного состава. Для этого нужно вспомнить реакции, по которым могли возникнуть интересующие нас соединения. Например CO образовалась по реакции

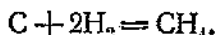


Следовательно, 1 моль CO состоит из моля C и 0,5 моля O_2 . Можно также сказать, что число молей C равно числу молей CO , а число молей O_2 равно 0,5 молей CO , т. е. 0,5 CO .

Углекислота, как видно из реакции



состоит из CO_2 молей C и CO_2 молей O_2 . Здесь, как уже было сказано выше, CO_2 нужно принимать не как химическое обозначение газа, а как алгебраическое обозначение числа молей CO_2 . Аналогично для образования CH_4 молей необходимо затратить CH_4 молей C и 2CH_4 моля H_2 , что, очевидно, из формулы



Таким образом, может быть составлена таблица элементарного состава газа (табл. 33).

Таблица 33

Подсчет элементарного состава газа

Элемент Наименование газа	C_0	H_0	O_0	N_0
CO	CO	—	0,5 · CO	—
CO_2	CO_2	—	CO_2	—
CH_4	CH_4	2CH_4	—	—
O_2	—	—	O_2	—
H_2	—	H_2	—	—
N_2	—	—	—	N_2

Суммирование данных таблицы определяет элементарный состав газа. Например содержание С в газе C_0 равно

$$C_0 = CO + CO_2 + CH_4. \quad (71)$$

Соответственно

$$H_0 = 2 CH_4 + H_2; \quad (72)$$

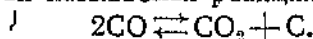
$$O_0 = 0,5 CO + CO_2 + O_2; \quad (73)$$

$$N_0 = N_2. \quad (74)$$

4. Коэффициент полноты сгорания

Зная количество углерода, содержащегося в газе С, и задаваясь элементарным составом горючей массы газифицируемого топлива, легко подсчитать расход топлива, необходимого для получения 100 молей сухого генераторного газа. Совершенно очевидно, что весь С газа обязан своим происхождением С топлива и, таким образом, пересчет не вызовет никаких затруднений.

Однако вопрос осложняется тем, что не весь С топлива переходит в газ. Часть С теряется при течении обратных реакций во „вредном пространстве“ генератора. К таким реакциям относится так называемая реакция Шенка:



Углерод в виде сажи оседает при этом на стенках генератора. Часть С попадает в золу и также выпадает из процесса.

Потери С учитываются коэффициентом полноты сгорания ξ :

$$\xi = \frac{C_0}{C_m}, \quad (75)$$

где C_m — углерод, содержащийся в топливе, затраченном при получении 100 кг-молей генераторного газа, на которые и ведется весь тепловой расчет.

Уравнение (75) можно переписать следующим образом:

$$\xi = \frac{C_m - C_n}{C_m} = 1 - \frac{C_n}{C_m}, \quad (76)$$

где C_n — суммарные потери С.

$$C_n = C_{сажа} + C_{зола}. \quad (77)$$

Потеря С в саже обычно оценивается в 2% от C_m :

$$C_{сажа} = 0,02 C_m. \quad (78)$$

Потеря С в золе зависит от зольности топлива и величины z , показывающей, какое количество С в очаговых остатках приходится на 1 кг золы. Значения z для различных топлив даны в табл. 34.

Таблица 34

Значение z для разных топлив

Топливо	Значение z	Топливо	Значение z
Дерево	0,2	Лингит-брикеты . . .	0,54
Древесный уголь . .	0,25	Торфяной кокс . . .	0,67
Каменный	0,25—0,43		

Формулу для определения величины $C_{зола}$ можно вывести, исходя из следующих соображений. Если на 1 кг золы приходится z кг С, то, следовательно, на A кг золы соответственно приходится $A \cdot z$ кг С. Если принять, что зольность рабочего топлива равна $A\%$, то на 1 кг топлива потери С в золе составят $\frac{Az}{100}$ кг. Полная потеря С в золе при газификации 100 молей сухого генераторного газа

$$C_{зола} = \frac{Az \cdot G_{общ}}{100 \cdot 12} \text{ кг-молей}, \quad (79)$$

где $G_{общ}$ — вес рабочего топлива, затраченного на получение 100 молей генераторного газа.

Рабочее топливо состоит из рабочей массы и балласта, к которому относят золу и гигроскопическую влагу:

$$M + A + W = 100\%, \quad (80)$$

Поэтому величина $G_{общ}$, входящая в формулу (79), может быть представлена следующим образом:

$$G_{общ} = \frac{G_{орг} \cdot 100}{[100 - (A + W)]} \text{ кг}. \quad (81)$$

Элементарный состав горючей массы задается. Если c , h , o и n — весовые доли С, H_2 , O_2 и N_2 в рабочей массе, то вес органической массы определится из следующей простой формулы:

$$G_{орг} = \frac{C_T}{c} \cdot 12 \text{ кг}, \quad (82)$$

где C_T — попрежнему число кг-молей С в топливе, а 12 — молекулярный вес С.

Тогда формула (81) перепишется так:

$$G_{общ} = \frac{C_T \cdot 12 \cdot 100}{c(100 - B)} \text{ кг}. \quad (83)$$

Здесь $B = A + W$.

Подставив значение $G_{общ}$ в формулу (79), окончательно получим:

$$C_{зола} = \frac{Az C_T \cdot 12 \cdot 100}{c \cdot 100 \cdot 12 (100 - B)} = \frac{Az C_T}{c(100 - B)} \text{ кг-молей}. \quad (84)$$

Подставляя значение $C_{зола}$ в формулу (76) и помня, что потери С в саже составляют 2% от общего количества С, получим выражение для определения коэффициента полноты сгорания:

$$\xi = 0,98 - \frac{Az}{c \cdot (100 - B)}. \quad (85)$$

Зная величину ξ , можно определить количество элементов

топлива, участвующих в процессе получения расчетного объема генераторного газа (100 молей). Согласно формуле (75)

$$C_m = \frac{C_n}{\xi} \text{ кг-молей.} \quad (86)$$

Определив C , можно по формулам (81) и (82) определить вес органической массы $G_{орг}$ и общий вес рабочего топлива. Количество других элементов находится из следующих выражений:

$$H_m = \frac{G_{орг} h}{2} \text{ кг-молей.} \quad (87)$$

$$O_m = \frac{G_{орг} o}{32} \text{ кг-молей;} \quad (88)$$

$$N_m = \frac{G_{орг} n}{28} \text{ кг-молей.} \quad (89)$$

Здесь h , o и n — весовые доли элементов в горючей массе топлива, а коэффициенты в знаменателе соответствуют переводу в кг-моли.

5. Подсчет выхода газа

Так как расход рабочего топлива определялся из расчета получения 100 молей сухого генераторного газа, то выход газа на 1 кг топлива

$$E = \frac{22,4 \cdot 100}{G_{общ}} \text{ м}^3/\text{кг.} \quad (90)$$

Выход газа для различных топлив дан в табл. 35.

Таблица 35
Выход газа из разных топлив

Топливо	$E \text{ м}^3/\text{кг}$
Дерево	2—3
Древесный уголь	4—6
Каменный уголь	3,3—4,5
Смесь дров (60%) и древесного угля	3,5—4,5
Углерод в идеальном воздушном процессе	5,38

6. Определение количества первичного воздуха

Если содержанием C газ обязан исключительно топливу, то присутствие в нем азота N_0 обеспечено двумя источниками — топливом и воздухом.

Очевидно

$$N_0 = N_g + N_m, \quad (91)$$

где N_s — количество кг-молей N_2 воздуха, участвующего в процессе газификации.

Отсюда

$$N_s = N_0 - N_T.$$

В воздухе, как известно, содержится 79% N_2 по объему, поэтому, зная N_s , можно определить общее количество первичного воздуха (первичным воздухом называется воздух, затраченный на газификацию, в отличие от вторичного воздуха, образующего с генераторным газом рабочую смесь для двигателя).

$$L = \frac{N_s}{0,79} \text{ кг-молей.} \quad (92)$$

При подсчете расхода воздуха в кг нужно пользоваться следующим выражением:

$$L = \frac{28,95 N_s}{0,79} = 36,7 N_s. \quad (93)$$

Количество O_2 воздуха, затраченного на газификацию, соответственно равно:

$$O_s = \frac{21 N_s}{79} = 0,266 N_s \text{ кг-молей.} \quad (94)$$

7. Определение количества связанного водорода. Правило Дюлонга

Согласно правилу Дюлонга часть H_2 топлива, определяемая количеством O_2 топлива, находится в связанном состоянии, образуя при газификации химическую воду. Количество связанного H_2 определяется поэтому по формуле

$$H_{cs} = 2O_m \quad (95)$$

так как при образовании воды на 1 моль O_2 приходится 2 моля H_2 .

И здесь, как и в других формулах, H_{cs} и $2O_m$ нужно понимать в их алгебраическом значении. Тогда количество свободного H_2 получится по разности

$$H_m' = H_m - 2O_m. \quad (96)$$

Свободный H_2 в результате процесса газификации переходит в генераторный газ, поэтому

$$H_0 = H_m' + H_{H_2O}, \quad (97)$$

где H_{H_2O} — водород, полученный по реакции $H_2O + C = CO + H_2$.

Очевидно, других источников получения H_2 быть не может. Решая уравнение (97) относительно H_{H_2O} :

$$H_{H_2O} = H_0 - H_m' = H_0 - (H_m - 2O_m);$$

$$H_{H_2O} = H_0 - H_m + 2O_m \text{ кг-молей,} \quad (98)$$

можно определить расход воды на реакцию водяного газа и количество тепла, затраченного на ведение этой эндотермической реакции.

8. Содержание паров воды в 1 м³ влажного газа

Количество паров воды, приходящихся на 100 кг-молей сухого генераторного газа, определяется балансом между приходом влаги, вводимой в процесс газификации, и ее расходом на реакцию водяного газа. Вес гигроскопической влаги

$$G_{H_2O} = \frac{w \cdot G_{\text{общ}}}{100} \text{ кг}, \quad (99)$$

где w — процентное содержание влаги в рабочем топливе по весу (относительная влажность).

Количество гигроскопической влаги в кг-молях

$$G_{H_2O} = \frac{w \cdot G_{\text{общ}}}{1800}.$$

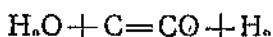
Тогда общее содержание воды в газе

$$H_2O = G_{H_2O} + 2O_7 - H_{H_2O} \text{ кг-молей}. \quad (100)$$

Здесь $2O_m$ — вода Дюлонга,

H_{H_2O} — вода, израсходованная по реакции водяного газа.

Из уравнения реакции водяного газа



ясно, что количество кг-молей, израсходованное по реакции водяного газа, равно числу кг-молей водорода, полученному по этой реакции. Поэтому в формулу (100) баланса воды может быть подставлена величина, найденная из уравнения (98). После подстановки значения H_{H_2O} получим:

$$H_2O = (G_{H_2O} - H_o + H_m) \text{ кг-молей}. \quad (101)$$

или

$$H_2O = 18(G_{H_2O} - H_o + H_m) \text{ кг}. \quad (102)$$

Так как весь расчет сделан на 100 молей сухого генераторного газа, то содержание паров воды в кг на 1 м³ газа определится из формулы:

$$g = \frac{18H_2O}{22,4(100 + H_2O)} = 0,8 \frac{H_2O}{100 + H_2O} \text{ кг/м}^3. \quad (103)$$

Здесь H_2O — в кг-молях.

9. Условия получения сухого генераторного газа

При газификации древесных чурок всегда получается влажный генераторный газ, так как участвующая в процессе влага с избытком покрывает расход воды на реакцию водяного газа. Однако при газификации древесного угля или антрацита может быть получен газ, не содержащий паров воды. Расчет определяет условия получения такого газа. При отсутствии паров воды

$$g = 0,8 \frac{H_2O}{100 + H_2O} = 0.$$

Следовательно,

$$H_2O = G_{H_2O} - H_o + H_m = 0.$$

Отсюда

$$H_o = G_{H_2O} + H_m. \quad (104)$$

Это и есть условия получения сухого газа. В этом случае количество кг-молей H_2 , содержащегося в газе, должно быть равно сумме кг-молей гигроскопической влаги и H_2 топлива. Следовательно, каждый раз, когда

$$H_o < G_{H_2O} + H_m, \quad (105)$$

продукты газификации будут содержать воду.

Если же, наоборот,

$$H_o > G_{H_2O} + H_m, \quad (106)$$

должна быть произведена присадка воды.

Количество присадочной воды при условии сохранения сухости получаемого газа определится из уравнения:

$$G_{np} = H_o - \left[H_m + \frac{w G_{opr}}{18(100 - B)} \right] \text{ кг-молей}$$

или

$$G_{np} = H_o - H_m - G_{H_2O} \text{ кг-молей.} \quad (107)$$

10. Составление материального баланса

На основании проведенных вычислений может быть составлен материальный баланс газогенераторного процесса. Материальный баланс составляется обычно в кг, причём расхождение между статьями прихода и расхода допускается не более 1—2,5%. Материальный баланс строится следующим образом:

Приход	Расход
Вес рабочего топлива . кг	Вес сухого генераторного газа, кг
Присадка воды	" влаги
Сухой воздух	" очаговых остатков
Итого . . .	Итого . . .

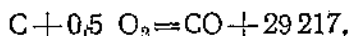
11. Тепловой баланс. Приход тепла от экзотермических реакций

В результате химического взаимодействия между тремя основными компонентами газогенераторного процесса (топливо, воздух и вода) возникает ряд реакций, идущих с поглощением и выделением тепла. Избыток тепла, оставшегося после образования газа, переходит в виде физического тепла к продуктам газификации и передается стенками газогенератора путем теплопередачи окружающему пространству.

Задавшись составом генераторного газа, можно подсчитать приход тепла от экзотермических реакций. При возникновении 1 моля CO_2 выделяется 97200 кал. Следовательно, общий эффект от образования CO_2 будет:

$$U_{\text{CO}_2} = 97200 \text{CO}_2, \quad (108)$$

где CO_2 — объемный процент CO_2 в газе. Объемный процент здесь соответствует числу кг-молей, так как весь расчет ведется на 100 кг-молей сухого газа. Соответственно приход тепла от сгорания C в CO был бы равен произведению 29217 CO. Однако это было бы справедливо, если бы вся CO получалась по экзотермической реакции



В действительности же часть CO получается по эндотермической реакции водяного газа. Очевидно, из общего количества CO нужно вычесть CO, полученную по этой реакции. Из уравнения реакции водяного газа видно, что количество получаемых CO и H_2 равны. Но определением величины $\text{H}_{\text{H}_2\text{O}}$ мы уже занимались при составлении материального баланса. Поэтому тепловой эффект от образования CO может быть подсчитан по формуле

$$U_{\text{CO}} = 29217 (\text{CO} - \text{H}_{\text{H}_2\text{O}}). \quad (109)$$

Тепловой эффект образования CH_4 равен:

$$U_{\text{CH}_4} = 20368 \text{CH}_4. \quad (110)$$

12. Физическая теплота паров воды и воздуха

Теплом экзотермических реакций исчерпываются приходные статьи теплового баланса большинства современных транспортных газогенераторов. Однако иногда применяются внешний подогрев первичного воздуха и перегрев пара. В этом случае физическое тепло пара и воздуха должно быть, безусловно, учтено в тепловом балансе. Физическое тепло пара

$$U_{\text{пар}} = m C_p^{\text{H}_2\text{O}} \cdot G_{\text{пар}} t_{\text{кал}}, \quad (111)$$

где

$$m C_p^{\text{H}_2\text{O}} = 8,24 + 0,000832 t,$$

$G_{\text{пар}}$ — определяется по формуле (107),

t — температура перегрева.

Физическое тепло первичного воздуха подсчитывается по уравнению

$$U_{\text{воз}} = m C_p^{\text{вз.-ам}} L t_a \text{ кал}, \quad (112)$$

где

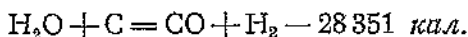
$$m C_p^{\text{вз.-ам}} = 6,83 + 0,0006 t,$$

$$L = \frac{N_a}{0,79} \text{ кг-молей},$$

t_a — температура подогрева воздуха.

13. Расход тепла

Полученное в результате экзотермических реакций тепло частично тратится на эндотермическую реакцию водяного газа:



Очевидно, затраченное тепло пропорционально количеству H_2 , полученному по этой реакции, поэтому

$$U_{(\text{CO} + \text{H}_2)} = 28351 \cdot H_{\text{H}_2\text{O}}. \quad (113)$$

Часть тепла затрачивается на испарение воды, участвующей в газогенераторном процессе. Согласно опытам Дитеричи, теплота испарения 1 кг-моля воды при 0° составляет 10710 кал. Расход тепла на испарение воды

$$U_e = 10710(G_{\text{H}_2\text{O}} + 2O_m + G_{np}) \text{ кал.} \quad (114)$$

Величины, стоящие в скобках, представляют сумму гигроскопической, химической и присадочной воды и определяются по предыдущим формулам.

14. Внешние потери на лучеиспускание и конвекцию

Внешние потери на охлаждение в окружающую среду складываются из потерь на конвекцию и лучеиспускание:

$$U_{\text{охла}} = U_k + U_{\text{л.}} \quad (115)$$

Потери на теплопередачу, конвекцией подсчитываются согласно закону Ньютона так:

$$U_k = kF(t_f - t_0)z, \quad (116)$$

где k — коэффициент теплопередачи в $\text{кал}/\text{м}^2 \text{ час}^\circ\text{C}$,

F — охлаждающая поверхность в м^2 ,

t — температура наружной поверхности газогенератора,

t_0 — температура окружающей среды,

z — время охлаждения в часах.

Так как весь расчет ведется на 100 кг-молей сухого генераторного газа, то z является временем, в течение которого газогенератор может выдать расчетное количество газа. Метод определения величины z будет дан ниже. Коэффициент теплопередачи может быть рассчитан по формуле:

$$k = \alpha \sqrt[4]{t - t_0}. \quad (117)$$

Значения α в зависимости от высоты вертикальной охлаждающей поверхности даны в табл. 36. Таблица составлена на основании опытов Дюлонга, Пэкле и других ученых для случая воздушной неподвижной среды.

Таблица 36

Значение α для подсчета коэффициента теплопередачи

Высота вертикальной поверхности, $H, \text{м}$	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
α —цилиндрической поверхности	2,43	2,38	2,34	2,31	2,28	2,26	2,24	2,22	2,20	2,18	2,16
α —плоской поверхности	2,20	2,18	2,16	2,14	2,12	2,10	2,08	2,06	2,05	2,04	2,03

Для плоских горизонтальных стенок (верхнее и нижнее днище газогенератора) α равно 1,75.

Температуры поверхности газогенератора, встречаемые на практике, даны в табл. 37.

Таблица 37

Практические данные о температурах поверхности газогенераторов

Часть поверхности газогенераторов	Температура
I. Дровяные газогенераторы	
Верхнее днище, когда бункер обогревается газом	70—120
Верхнее днище, когда бункер без подогрева	50
Нижнее днище без изоляции	280—320
Нижнее днище с изоляцией	180—200
Боковая поверхность, верхняя часть (с подогревом бункера)	50—80
Боковая поверхность, средняя часть (с подогревом бункера)	170—230
Боковая поверхность, нижняя часть (с подогревом бункера)	250—280
Боковая поверхность, верхняя часть (без подогрева бункера)	40—60
Боковая поверхность, нижняя часть (без подогрева бункера)	180—200
Шахта газогенератора	250—400
II. Угольные газогенераторы	
Верхнее днище	70—100
Бункер	120—150
Шахта	250—300
Зольник	300—400

Подсчет тепловых потерь на конвекцию производится отдельно для различных частей газогенератора, после чего результаты суммируются

$$U_k = \sum U'_k. \quad (118)$$

Согласно закону Стефана-Больцмана 1 м^2 поверхности абсолютно черного тела, нагретого до $T^\circ \text{ К}$, излучает в течение часа

$$C_s \left(\frac{T}{100} \right)^4 \text{ кал},$$

где C_s — коэффициент излучения абсолютно черного тела, равный 4,96.

Для решения технических задач применяется формула

$$U_{\lambda} = FCZ \left(\frac{T}{100} \right)^4 \text{ кал,} \quad (119)$$

где F — излучающая поверхность в м^2 ,
 C — коэффициент излучения данного материала,
 Z — время в часах.

Значение коэффициентов излучения для различных материалов дано в табл. 38.

Таблица 38

Коэффициенты излучения для различных тел

Материал и род поверхности	C
Абсолютно черное тело	4,96
Латунь полированная	0,25
прокатная, необработанная	0,34
Медь полированная	0,20
Алюминий полированный	0,26
Железо листовое никелированное	0,29
" " луженое, блестящее	0,28
" " матовое, луженое	0,41
" " оцинкованное новое	1,13
" " " старое	1,37
" " матовое, покрытое ржавчиной	3,40
Сталь листовая с пленкой после прокатки	3,26
" " оксидированная с блестящей поверхностью	4,06
Лаковые поверхности разной окраски	4,46
Растительная земля (гумус)	3,14
Глина	1,85
Пахотная земля	1,79

При подсчете тепла, отданного окружающему пространству боковой поверхности газогенератора, нужно предварительно найти среднюю температуру поверхности. Для этого строят схему распределения температур (фиг. 23). Конфигурация схемы зависит от того, по какому процессу газифицируется топливо. При прямом процессе температура поверхности почти по закону прямой падает от зольника к верхней части бункера. При опрокинутом процессе получается ломаная линия (фиг. 24) с вершиной, расположенной недалеко от плоскости фурм. Средняя температура может быть определена тем же методом, что и среднее индикаторное давление по индикаторной диаграмме. Очевидно,

$$t_{cp} = k \frac{f}{h}, \quad (120)$$

где f — площадь, ограниченная ломаной линией и поверхностью генератора,

h — высота газогенератора,

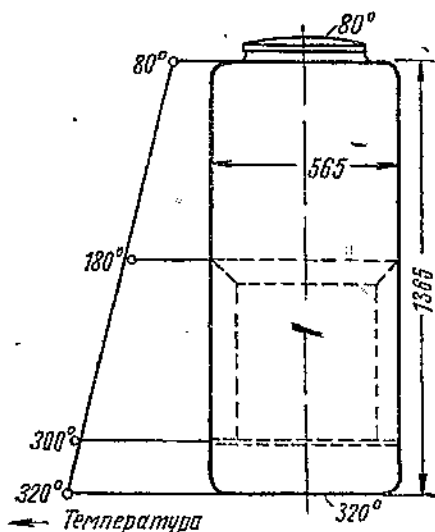
k — масштаб температур.

Если днище газогенератора расположено недалеко от земли или какой-либо детали установки, действующей как экран, то

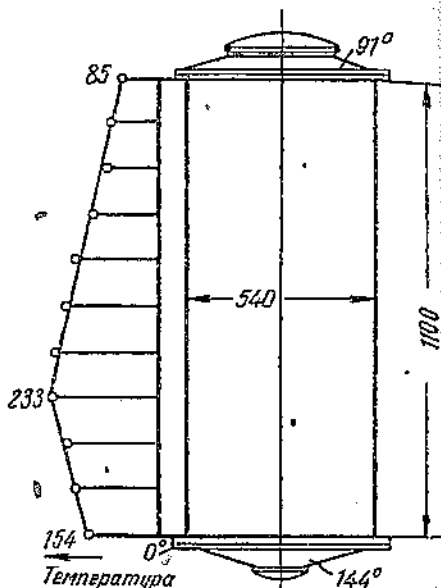
для данного участка поверхности расчет потери тепла на излучение нужно произвести по формуле:

$$U_A = \frac{FZ \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_s}} \text{ кал,} \quad (121)$$

где T_1 — абсолютная температура днища,
 T_2 — абсолютная температура экрана,
 C_1 — коэффициент излучения днища,
 C_2 — коэффициент излучения экрана,
 C_s — коэффициент излучения абсолютно черного тела.



Фиг. 23. Схема распределения температур на поверхности газогенератора при прямом процессе.



Фиг. 24. Распределение температур на поверхности газогенератора при обратном процессе

При расчете потерь на охлаждение боковой поверхности газогенератора можно пользоваться также формулой Рамбуша, дающей достаточно точные результаты:

$$U_{охл}^{б.н} = 2,8 (T_n^4 - T_0^4) 10^{-8} + 3,5 (t_n - t_0)^{1,23} \text{ кал, м}^2 \text{ час,} \quad (122)$$

где T_n и t_n — средняя температура поверхности,
 T_0 и t_0 — температура окружающей среды,
 2,8 — фактор радиации, 3,5 — фактор конвекции (по Рамбушу).

15. Уравнение теплового баланса

Подсчитанные таким образом отдельные статьи теплового баланса могут быть сведены в одно общее уравнение:

$$U_{CO_2} + U_{CO} + U_{CH_4} = U_{(CO + H_2)} + U_v + U_{охла} + U_z. \quad (123)$$

Последний член теплового баланса U_z представляет собой физическое тепло, уносимое продуктами газификации из генератора. Решая уравнение относительно U_z и зная среднюю теплоемкость генераторного газа, можно определить температуру газа, выходящего из генератора:

$$U_z = (mC_p)_{cp} (100 + H_2O) t_z \text{ кал.} \quad (124)$$

16. Коэффициент полезного действия газогенератора

Превращение твердого топлива в газообразное не обходится даром. В цепи превращений потенциальной химической энергии топлива в механическую энергию двигателя, газогенератор является дополнительным звеном, требующим свою долю тепловых потерь. Эти потери на газификацию учитываются к. п. д. газогенератора η_z . На основании материального баланса можно написать:

$$\eta_z = \frac{H_u \cdot 2240}{h_u G_{общ}}, \quad (125)$$

где H_u — низшая теплотворная способность газа,

2240 — объем полученных 100 кг-молей,

h_u — низшая теплотворная способность рабочего топлива,

$G_{общ}$ — общий расход топлива в кг, затраченного на получение газа.

По уравнению (90) $\frac{2240}{G_{общ}} = E$, поэтому выражение (125) может быть представлено в несколько ином виде:

$$\eta_z = \frac{H_u \cdot E}{h_u}. \quad (126)$$

С другой стороны, заменяя величину $G_{общ}$ рядом-эквивалентных значений, можно получить формулу для η_z в другом виде:

$$\eta_z = \frac{H_u \cdot 2240 \cdot c \cdot \xi (100 - B)}{h_u \cdot C_0 \cdot 100}. \quad (127)$$

Выражению (126) можно придать форму, общую всем уравнениям, определяющим степень термического использования агрегата:

$$\eta_z = \frac{h_u - q}{h_u} = 1 - \frac{q}{h_u}. \quad (128)$$

Из уравнения (128) ясно, что в теплотворную способность газа переходит вся химическая способность топлива за исключением всех тепловых и химических потерь q от недожога C (сажа, провал в зольник и уносы из газогенератора угольной пыли). Решив совместно уравнения (126) и (128), получим:

$$q = h_u - EH_{u, \text{г}} \quad (129)$$

Примерный расчет к. п. д. процесса газификации может быть сделан на основании простейшей реакции сгорания C в CO :



Очевидно теплом, „подведенным“ к процессу, будет в данном случае теплотворная способность участвующего в сгорании $C - 97200 \text{ кал.}$ Теплотворная способность полученной CO есть полезный результат процесса. Тепловые потери определяются тепловым эффектом реакции, так как выделившиеся 29217 кал не могут быть в дальнейшем использованы. Следовательно,

$$\eta_2 = \frac{97200 - 29217}{97200} = 0,7.$$

Это значение для η_2 было получено раньше — при расчете идеально воздушного процесса. К. п. д. транспортного газогенератора обычно колеблется в пределах $0,7 - 0,8$.

V. КОНСТРУКТИВНЫЙ РАСЧЕТ ГАЗОГЕНЕРАТОРА

1. Увязка теплового и конструктивного расчетов

В результате теплового расчета газогенератора были получены его материальный и тепловой балансы, отнесенные к 100 кг-молей сухого газа. Для перехода от теплового расчета к конструктивному необходимо выяснить, скольким часам работы газогенератора соответствуют расчетные 100 кг-молей .

Зная литраж двигателя и число оборотов в минуту коленчатого вала, можно определить объем рабочей смеси, засосанной двигателем в течение часа:

$$Q_{см} = FSi \eta_v \frac{n}{2} 60 \text{ м}^3/\text{час.} \quad (130)$$

Здесь F — площадь поршня в м^2 ,

S — ход поршня в метрах,

i — число цилиндров,

η_v — коэффициент подачи,

n — число оборотов в минуту.

Формула (130) дает $Q_{см}$ для четырехтактного двигателя. Подставив в формулу вместо произведения FSi величину общего рабочего объема в литрах V_h , окончательно получим:

$$Q_{см} = 0,03 V_h \eta_v n \text{ м}^3/\text{час} \quad (131)$$

Рабочая смесь, засасываемая двигателем, состоит из генераторного газа Q_z , вторичного воздуха $\alpha L_0 Q_z$ и некоторого количества паров воды [см. уравнение (16)], равного ωQ_z . Поэтому часовой объем рабочей смеси может быть представлен в виде суммы

$$Q_{см} = Q_z + \alpha L_0 Q_z + \omega Q_z,$$

или

$$Q_{см} = Q_z (1 + \alpha L_0 + \omega).$$

Отсюда

$$Q_z = \frac{Q_{см}}{1 + \alpha L_0 + \omega} \text{ м}^3/\text{час}. \quad (132)$$

Зная часовой отбор газа Q_z , легко определить время выдачи расчетного количества 100 кг молей. Очевидно, время

$$Z = \frac{2240}{Q_z'} \quad (133)$$

В уравнение (133) должно быть подставлено значение Q_z' при нормальных физических условиях. Если Q_z , полученное по формуле (132), соответствует P_0 и T_0 , отличным от нормальных физических условий, то необходимо произвести пересчет, смысл которого ясен из следующего соотношения:

$$Q_z' = \frac{273}{T_0} \cdot \frac{P_0}{760} Q_z,$$

(где P_0 — в мм рт. ст.¹⁾),

или

$$Q_z' = 0,36 \frac{P_0}{T_0} Q_z. \quad (134)$$

Теоретическое количество воздуха, необходимое для сгорания 1 м³ генераторного газа L_0 , определяется химическим составом продуктов газификации:

$$L_0 = \frac{1}{0,21} [0,5 (\text{CO} + \text{H}_2) + 2 \text{CH}_4 - \text{O}_2] \text{ м}^3/\text{м}^3. \quad (135)$$

Входящие в уравнение компоненты генераторного газа даны в объемных долях. Коэффициент избытка воздуха α для двигателей, работающих на генераторном газе, колеблется от 1,05 до 1,2.

Определив время Z , можно на основании материального баланса найти ряд параметров, характеризующих работу генератора. Например часовой расход топлива

$$G_{\text{час}} = \frac{G_{\text{обц}}}{Z} \text{ кг/час}. \quad (136)$$

¹ Абсолютное давление P_0 и температура T_0 соответствуют тем условиям, для которых принято числовое значение коэффициента подачи η_p . Для газового двигателя удобно принимать давление и температуру во всасывающей коллекторе, так как эти условия широко известны. В этом случае коэффициент подачи должен быть отнесен к этим же условиям. Р е д.

Таким же образом может быть получен часовой расход первичного воздуха

$$L_{\text{час}} = \frac{L}{Z} \text{ м}^3/\text{час}, \quad (137)$$

$$L = \frac{N_e}{0,79} \cdot 22,4 \quad [\text{см. уравнение}].$$

Часовой расход газифицируемого топлива можно также определить, зная мощность двигателя и экономический к. п. д. газогенераторной установки. Экономический к. п. д. установки равен

$$\eta_1 = \eta_e \eta_2, \quad (138)$$

где η_e — эффективный к. п. д. двигателя,
 η_2 — к. п. д. газогенератора;

$$\eta_2 = \frac{632,3}{g_e h_u}, \quad (139)$$

где g_e — удельный расход топлива в кг/э.с.ч.,
 h_u — теплотворная способность топлива.

Отсюда

$$g_e = \frac{632,3}{h_u \eta_2},$$

и часовой расход

$$G_{\text{час}} = \frac{632,3 N_e}{h_u \eta_2} \text{ кг/час}. \quad (140)$$

Определив часовые расходы топлива и первичного воздуха, можно определить основные конструктивные размеры газогенератора.

2. Определение размеров бункера.

Бункером называется верхняя часть газогенератора, расположенная над камерой газификации. Размером бункера определяется запас топлива, находящегося в нем. Однако влияние размера бункера на работу газогенератора не ограничивается уменьшением или увеличением интервалов между двумя загрузками. Чем больше бункер, тем дольше топливо подвергается подсушке и сухой перегонке, прежде чем попадает в активную зону. Объем бункера определяет размеры поверхности охлаждения газогенератора и, таким образом, влияет на величину $U_{охл}$, входящую в тепловой баланс газогенератора. Если V_b — объем бункера, а B [см. уравнение (19)] — насыпной вес топлива в кг/м³, то, очевидно, вес топлива, загруженного в бункер, будет $V_b B$ кг.

Время, на которое хватит этого запаса,

$$Z' = \frac{V_b B}{G_{\text{час}}} \text{ час.}$$

Отсюда

$$V_b = \frac{G_{\text{час}} Z'}{B} \text{ м}^3. \quad (141)$$

Время запаса не должно превышать 1,5—2,5 часа, так как иначе объем бункера может нарушить габариты установки. Насыпной вес для различных топлив дан в табл. 39. Кроме того, можно пользоваться данными, приведенными в главе о топливе.

Насыпной вес различных топлив

Таблица 39

Род топлива	Насыпной вес в кг/м³	Примечания
Древесные чурки		
Сосна	220	Чурки $w=12\%$ Размер 50×50×60
Ель	230	
Береза	270	
Бук	275	
Дуб	290	
Антрацит	700	Размеры, применяемые в легких газогенераторах
Бурый уголь	650—700	
Каменный уголь	700—750	
Карбонит	700—800	
Кокс газовый	300—400	
Торф сухой	300—350	
Торф сырой	400—500	
Торфяные брикеты	800	
Древесный уголь		
Еловый	130	$w=6-8\%$
Сосновый	148	
Березовый	190	

3. Определение размеров камеры газификации

Аналитический расчет камеры газификации до настоящего времени является не вполне решенной задачей. С точки зрения редукиционной теории высота активной зоны приписывалось решающее влияние на газогенераторный процесс. И действительно, при редукиционном режиме газогенератора недостаточная величина восстановительной зоны может привести к повышенному содержанию продуктов сгорания в генераторном газе. При переходе редукиционного режима на скоростной высота активной зоны сокращается до нескольких сантиметров. Расчет высоты активной зоны нужно поэтому производить с учетом режима, на котором работает газогенератор.

Теоретические трудности, связанные с расчетом высоты активной зоны, привели к тому, что на практике при конструировании генератора пользуются рядом эмпирических отношений, дающих возможность игнорировать физико-химическую сторону процесса. При расчете газогенератора, работающего на древесном топливе, критерием для выбора основных размеров камеры газификации является не полнота протекания вос-

становительных реакций, а получение газа, лишенного смолистых соединений. Для получения бессмольного газа при удовлетворительном химическом составе существует определенный минимум объема камеры и высоты активного слоя топлива в ней. Наряду с этим при выборе размеров камеры исходят из условия иметь достаточный срок ее службы. Однако такой эмпирический подход к расчету является лишь следствием недостатков существующей теории и в дальнейшем, несомненно, будет заменен аналитическим методом.

Помимо высоты активной зоны определению подлежат площадь сечения камеры, число и диаметр воздушных фурм. Площадь колосниковой решетки (при прямом процессе), или зеркало горения (в опрокинутом процессе), определяется выбором параметра R кг/м²час, где R — напряжение горения исследуемого сечения камеры газификации:

$$R = \frac{G_{\text{гас}}}{F} \text{ кг/м}^2\text{час}, \quad (142)$$

откуда

$$F = \frac{G_{\text{гас}}}{R} \text{ м}^2. \quad (143)$$

Величина R определяется видом газифицируемого топлива и методом ведения процесса газификации. В стационарных газогенераторах, работающих на редукионном режиме, значение R колеблется в следующих пределах (табл. 40).

Для легких газогенераторов, работающих на редукионном режиме, характерны следующие данные (табл. 41).

Таблица 40

Напряжения колосниковой решетки у стационарных газогенераторов

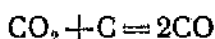
Топливо	R кг/м ² час
Каменный уголь . . .	100—150
Кокс	120—180
Буроугольный брикет .	130—210
То, ф	150—200
Дрова	350—450

Таблица 41

Значение параметра R у легких газогенераторов

Топливо	R кг/м ² час
Древесный уголь . .	200—250
Дрова	550—900
Антрацит	250—350

Из приведенных таблиц видно, что напряжение горения для легких газогенераторов в общем мало отличается от значений того же параметра в стационарных установках. О причинах этого явления мы уже говорили. Величина R органически связана с временем контакта газовых масс со слоем топлива. Из редукионных теорий с логической неизбежностью вытекает требование обеспечить минимальное время контакта, необходимое для восстановления продуктов полного сгорания. Скорость реакции



ставила поэтому предел увеличению производительности газогенераторов, устраняя фактически разницу между стационарными и транспортными установками.

На основании опытов по высокоскоростной газификации Гроздовский и его сотрудники предлагают следующие режимы работы газогенераторов и слоевых топок. При скорости воздуха в 1—2 м/сек (считая на холодное дутье и свободное сечение газогенератора) напряжение горения для беззольного топлива (древесный или электродный уголь) может достигать 700—1400 кг/м²час; соответствующее значение для подмосковного угля 2500—5000 кг/м²час.

Таким образом, при сравнении этих цифр мы видим полный разрыв между двумя различными режимами процесса газификации.

Зная часовой расход первичного воздуха, можно рассчитать число и диаметр фурм. Часовой расход воздуха

$$L' = \frac{\pi d^2}{4} n \cdot c_{\phi} \cdot 3600 \text{ м}^3/\text{час}, \quad (144)$$

где d — диаметр фурмы в м,

n — число фурм,

c_{ϕ} — скорость воздуха в фурмах в м/сек.

Часовой расход L' должен быть отнесен к условиям температуры и давления воздуха, выходящего из фурм. Так как расход воздуха по материальному балансу газогенератора подсчитан для нормальных физических условий, то необходимо сделать пересчет:

$$L' = L_{\text{час}} \frac{273 + t_0}{273} \cdot \frac{760}{P_0}. \quad (145)$$

Решая уравнение (144) относительно диаметра фурм, получим:

$$d = 1,88 \sqrt{\frac{L'}{n \cdot c_{\phi}}} \text{ см}. \quad (146)$$

При периферийном дутье число фурм следует выбирать в зависимости от диаметра камеры газификации d_k .

Таблица 42

d_k в мм	160—200	200—220	220—250	250—300
n	10	12	14	16

От скорости воздуха в фурмах в значительной степени зависит сопротивление газогенератора, а следовательно, и коэффициент подачи двигателя. Значение c_{ϕ} колеблется в широких пределах — от 20 до 45 м/сек — и определяет собой величину

и форму воздушного спектра в камере газификации. При большом диаметре сечения необходимо увеличить скорость воздуха в фурмах, так как иначе может возникнуть непрогорающая зона, через которую вследствие недостатка O_2 могут свободно проходить продукты сухой перегонки. Опыты инж. Мезина в НАТИ показали, что наиболее рациональной формой для фурм является насадок Вентури, при котором сопротивление получается наименьшим. Для фурм цилиндрической формы сопротивление может быть подсчитано по формуле

$$\Delta P = \beta \frac{c \rho^2}{d} \gamma \cdot l \quad (147)$$

Таким образом, перепад давления в фурме прямо пропорционален квадрату скорости, удельному весу воздуха γ , длине фурмы l и обратно пропорционально диаметру фурмы d ; β — коэффициент пропорциональности.

Скорости воздуха в фурмах для некоторых конструкций даны в табл. 43.

Скорости воздуха в фурмах Таблица 43

Наименование газогенератора	Способ подвода воздуха	c_{ϕ} м/сек
НАТИ-Г-14	Периферийный, $n=10$, $d=8$	20—25
ЗИС-21	" $n=10$, $d=9,2$	30—35
НАТИ-Г-21	Одна фурма $d=13$	—
НАТИ-Г-23	" $d=25$	—
Берлие	Периферийный, $n=5$, $d=8$	56

4. Методы определения высоты активной зоны

Расчет высоты активной зоны, основанный на принципе редуccionной теории, сводится к определению времени контакта продуктов полного сгорания с поверхностью раскаленного топлива, образующего восстановительный слой. Время контакта газовых масс с топливом зависит от объема активной зоны и секундного отбора газа. Секундный отбор газа пропорционален часовому расходу топлива, определяемому из теплового расчета газогенератора. Однако секундные объемы газа, проходящие через верхний и нижний слои активной зоны, не равны между собой. Это происходит оттого, что реакция восстановления $CO_2 + C = 2CO$ идет с увеличением объема. Если число молей продуктов полного сгорания в общем равно числу молей первичного воздуха, то в дальнейшем, по мере восстановления части CO_2 , происходит увеличение числа молей продуктов газификации. Понятно, что речь идет не о гей-люссаковском увеличении объема за счет изменения температуры, а о молекуляр-

ном изменении. Поэтому средний по зоне восстановления отбор газа будет:

$$Q = \frac{G_{\text{гис}}(L + E)}{2 \cdot 3600} \text{ м}^3/\text{сек}, \quad (148)$$

где L — первичный воздух в $\text{м}^3/\text{кг}$,
 E — выход газа из топлива в $\text{м}^3/\text{кг}$.

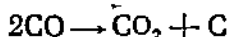
Тогда время контакта выразится формулой:

$$\tau = \frac{V_z}{G_{\text{гис}}} \cdot \frac{\mu \cdot 2 \cdot 3600}{(L + E) \left(\frac{t + 273}{273} \right)} \text{ сек.} \quad (149)$$

где V_z — объем восстановительной зоны в м^3 ,
 μ — коэффициент свободного пространства [см. уравнение (19)],

t — средняя температура газа в слое топлива.

В случае правильно подобранного объема восстановительной зоны время контакта τ должно быть равно времени протекания восстановительных реакций. При температуре $900-1100^\circ$, характерной для восстановительного слоя, скоростью реакции



можно пренебречь и весь расчет „химического“ времени вести только по реакции восстановления:



Скорость этой реакции по закону действующих масс равна:

$$\frac{d(\text{CO})}{dz} = k_1(\text{CO}_2). \quad (150)$$

Отсюда следует, что скорость образования CO пропорциональна концентрации CO_2 . Концентрация CO_2 по мере восстановления меняется и принимает все новые и новые значения. Формулу (150) можно несколько видоизменить. Введем следующие обозначения. Пусть x — содержание CO в газе по истечении времени z (в объемных долях), a — содержание CO_2 в начале реакции ($z=0$), k_1 — константа скорости реакции [см. уравнение (150)], z — время в секундах¹. Тогда при восстановлении всей CO_2 объемное количество продуктов газификации увеличилось бы и стало равным $(1+a)$ объемным долям.

Например смесь из 0,21 объемной доли CO_2 и 0,79 доли N_2 после восстановления всей CO_2 состояла бы из 0,79 объемных единиц N_2 и 0,42 объемных единиц CO , так как объем продуктов полного сгорания при восстановлении увеличивается вдвое. Таким образом,

$$0,79 + 0,21 = 0,21 + 2 \cdot 0,21 = 1,21.$$

¹ Время пребывания газа в камере, обозначенное здесь z , не следует смешивать с временем образования 100 молей газа, имевшим обо значение. З. Ред.

Объемное содержание CO при полном восстановлении CO_2 может быть получено из отношения $\frac{2a}{a+1}$.

В нашем примере это составит:

$$\frac{2 \cdot 0,21}{1+0,21} = \frac{0,42}{1,21} = 0,347,$$

т. е. 34,7%.

Этот результат и следовало ожидать, так как при полном восстановлении CO_2 получается идеально-воздушный газ, состоящий из 34,7% CO и 65,3% N_2 .

Чтобы получить абсолютное количество CO_2 , затраченное на образование CO , необходимо объемное (процентное) содержание CO умножить на общий объем газовой смеси. При этом нужно помнить, что расход CO_2 будет в два раза меньше количества CO , так как при восстановлении 1 м³ CO_2 получается 2 м³ CO . Поэтому при полном восстановлении CO_2 ее расход будет:

$$\frac{a+1}{2} \cdot \frac{2a}{a+1} = a,$$

т. е. вся CO_2 будет израсходована. Однако на практике такой идеальный случай невозможен. Содержание CO в газе x бывает меньше $\frac{2a}{a+1}$. Поэтому, пользуясь нашими обозначениями, расход CO_2 на образование CO будет:

$$\frac{a+1}{2} \cdot x.$$

Количество CO_2 , оставшейся после восстановления, получится, как разность

$$a - \frac{a+1}{2} \cdot x.$$

Поэтому окончательно уравнение (150) может быть переписано следующим образом:

$$\frac{dz}{dx} = k_1 \left(a - \frac{a+1}{2} \cdot x \right). \quad (151)$$

После интегрирования это уравнение принимает следующий вид:

$$k_1 z = \frac{2,303}{1+a} \cdot \lg \left(\frac{1}{a - \frac{a+1}{2} \cdot x} \right) + C. \quad (152)$$

Для определения константы интегрирования C задаются начальными условиями, при которых $z=0$ и $x=0$; величинами a и k_1 задаются. На основании опытов Клемента, Адамса и Хаскина значения k_1 в зависимости от температуры и вида топлива даны в табл. 44.

Если концентрация CO_2 в начале процесса равна единице и $x=0$, константа интегрирования, как в этом легко убедиться подстановкой численных значений параметров, входящих в формулу (152), равна нулю.

Таблица 44

Влияние температуры на константу скорости реакции $\text{CO}_2 + \text{C} = 2\text{CO}$

Температура °C	K_1 (для частиц диаметром ~ 5 мм)		
	древесный уголь	кокс	антрацит
800	0,021	—	—
900	0,159	0,0023	—
1000	0,629	0,023	—
1100	1,530	0,134	0,119
1200	—	0,410	0,237
1300	—	1,48	0,579

Формула (152) принимает для этого случая более простой вид:

$$k_1 z = 2,303 \lg \left(\frac{1}{1-x} \right). \quad (153)$$

Последнее выражение могло бы быть получено и непосредственно при интегрировании уравнения:

$$\frac{dx}{dz} = k_1 (1-x).$$

Расчет зоны восстановления по редукционной теории, как уже было сказано выше, состоит в определении объема восстановительного слоя, при котором соблюдалось бы основное условие

$$\tau = z. \quad (154)$$

Поэтому должно быть соблюдено следующее равенство:

$$\frac{V_{\text{з}} \mu \cdot 2 \cdot 3600}{G_{\text{нec}}(L+E) \left(\frac{t+273}{273} \right)} = \tau_{\text{сек.}}$$

отсюда

$$V_{\text{з}} = \frac{G_{\text{нec}}(L+E) \left(\frac{t+273}{273} \right) \cdot z}{2 \cdot 3600 \cdot \mu}. \quad (155)$$

Зная объем восстановительной зоны, легко определить ее высоту. Для цилиндрической камеры газификации

$$V_{\text{з}} = FH \text{ м}^3, \quad (156)$$

где F — площадь сечения камеры в м^2 ,

H — высота зоны в м^2 .

Заменяя часовой расход топлива произведением

$$G_{\text{час}} = RF \text{ [см. уравнение (143)],}$$

получим:

$$\frac{FH_{\mu} \cdot 7200}{RF(L+E) \left(\frac{t+273}{273} \right)} = z,$$

отсюда

$$H = \frac{zR(L+E) \left(\frac{t+273}{273} \right)}{\mu \cdot 7200} \quad (157)$$

Таким образом, необходимая высота восстановительной зоны пропорциональна среднему отбору газа:

$$\frac{(L+E)}{2} \cdot \left[\frac{(t+273)}{273} \right] \text{ м}^3/\text{час.}$$

С увеличением отбора газа время контакта должно уменьшиться и по редукионной теории для сохранения равенства $\pi = z$ высота активной зоны должна быть увеличена. Но в легких газогенераторах, работающих с опрокинутым горением, высота активной зоны ограничена конструкцией камеры газификации.

Активная зона располагается, как известно, между фурменным поясом (при периферийной подаче воздуха) и колосниковой решеткой. Если же колосниковая решетка отсутствует, то нижней границей активной зоны является место отвода газа из раскаленного слоя топлива. Таким образом, помимо термохимической высоты активной зоны, определяемой условиями протекания реакции, существует конструктивная высота активной зоны. Необходимым условием для равенства обеих зон и будет отношение

$$\frac{\pi}{z} = 1,$$

Однако весь приведенный расчет высоты восстановительного слоя носит частный характер и может быть применен только для редукионного режима газогенератора. Редукионный режим, как уже было сказано, устанавливается при недостаточной скорости выноса продуктов горения из кислородной зоны, когда продукты газификации, полученные в плоскости фурм, обогащаются CO_2 за счет сгорания CO . Тогда, естественно, возникает необходимость в дальнейшем протекании восстановительных реакций, без которых газогенераторный процесс теряет технический смысл.

Редукионный режим переходит в скоростной при достижении скорости прохождения газа в слое топлива критического значения.

При фурменном подводе воздуха основным критерием скоростного режима является скорость выхода воздуха из фурм, скорость газа в слое топлива имеет лишь значение подсобного параметра.

Величина критической скорости зависит от вида газифицируемого топлива, но в общем для кусков размером до 3 мм колеблется от 0,3 до 0,5 м/сек, считая на полное сечение камеры и на холодное дутье. При этой скорости выноса первичных продуктов газификации роль вторичных процессов сводится к минимуму, и полученная СО „не успевает“ сгореть в СО₂.

Расчет высоты зоны, построенной на основании первичного образования СО, методически принципиально отличается от приведенного выше. Ввиду огромных скоростей реакции



процессом, лимитирующим скорость образования СО, является диффузия О₂ сквозь газовую пленку, образующуюся на поверхности топлива. Скорость диффузии определяется формулой Фика [см. уравнение (32)]:

$$dn = -Dg \cdot \frac{dc}{dx} \cdot dz,$$

откуда толщина пленки

$$\delta = \frac{Dg(C_0 - C_1) \cdot z}{n} \text{ см.} \quad (158)$$

Здесь $C_0 - C_1$ — разность концентрации О₂ на границах пленки, которая может быть приравнена к средней концентрации в кислородной зоне; остальные обозначения — те же.

Поверхность g может быть представлена в виде произведения удельной поверхности топлива f м²/м³ например, для чурок (табл. 8 и 9), на объем активной зоны или камеры газификации.

В активной зоне древесночурочного генератора всегда находится размельченный древесный уголь. Поэтому для расчетов процессов диффузии значение удельной поверхности f нельзя брать по табл. 8 и 9, где приведены удельные поверхности чурок. Для правильного выбора f необходимы специальные эксперименты.

Тогда активная поверхность топлива, находящегося в камере газификации, будет:

$$g = f \cdot V_k \cdot 10^4 \text{ см}^2, \quad (159)$$

где V_k — объем камеры газификации в м³.

Для цилиндрической камеры

$$g = f \cdot FH \cdot 10^4. \quad (160)$$

Подставляя значение g в уравнение (158) и решая его относительно H , окончательно получим:

$$H = \frac{\delta \cdot n}{Df(C_0 - C_1) \cdot z \cdot 10^4} \text{ м.} \quad (161)$$

Здесь z — время, в течение которого газогенератор может выдать 100 молей газа, в секундах,

n — количество молей O_2 , которое должно продиффундировать за это время через газовую пленку.

Методика этого расчета предложена инж. Вознесенским. Толщина пленки зависит от скорости воздуха и при переходе на скоростной режим достигает 0,07 см. Эта цифра нуждается в дополнительной проверке.

Таким образом, мы видим, что методика расчета камеры газификации зависит от режима работы газогенератора, режим же определяется рядом связанных между собой параметров.

Помимо напряжения зеркала горения и времени контакта необходимо ввести еще следующие величины.

Скорость движения газов в слое топлива

$$w = \frac{Q_z}{F_{\mu} \cdot 3600} \text{ м/сек.} \quad (162)$$

Если Q_z дано при 0° , то необходимо ввести поправку на температуру:

$$w = \frac{Q_z \left(\frac{t + 273}{273} \right)}{F_{\mu} \cdot 3600} \text{ м/сек.}$$

Интересным параметром является объемное тепловое напряжение камеры газификации:

$$\beta = \frac{G_{\text{нас}} h_n (1 - \eta_2)}{V_k \cdot 3600} \text{ кал/м}^3 \cdot \text{сек}, \quad (163)$$

где h_n — теплотворная способность топлива,

η_2 — к. п. д. процесса газификации.

Здесь η_2 не учитывает механический недожог топлива — провал в зольник и унос угольной пыли из газогенератора; к. п. д. процесса газификации не следует смешивать с к. п. д. газогенератора.

Очевидно, β характеризует тепло, выделившееся в секунду на 1 м³ объема камеры. Это тепло, оставшееся после завершения процесса газификации, является потерянными и в дальнейшем расходуется на подогрев газа, выходящего из генератора, и теплоотдачу в окружающее пространство. Легко видеть, что величины β и R связаны между собой. Формулу (163) можно переписать следующим образом:

$$\beta = \frac{FR h_n (1 - \eta_2)}{FH \cdot 3600},$$

откуда

$$H = \frac{R h_n (1 - \eta_2)}{\beta \cdot 3600} \text{ м.} \quad (164)$$

Таким образом, зная практические значения параметров

R и β , можно рассчитывать высоту активной зоны¹. На этом основаны все эмпирические методы расчета, применявшиеся до сих пор в стационарной и транспортной технике.

Посмотрим, чему равна величина β для легких газогенераторов. Например газогенератор Г-14, работающий на древесных чурках, имеет камеру типа Берлие (фиг. 25). Объем камеры от плоскости фурм до нижней кромки $V_k = 4,7$ л. Часовой расход топлива $G_{\text{час}}$ равняется 27 кг/час. Теплотворная способность чурок может быть определена по эмпирической формуле проф. Надежина:

$$h_a = 4370 - 50 W_{\text{отн}}, \quad (165)$$

где $W_{\text{отн}}$ — относительная влажность.

При $W_{\text{отн}}$ равном 12%, h_a равняется 3770 кал/кг; η_2 — может быть принят равным 0,75. Подставив все эти значения в формулу (163), получим объемное тепловое напряжение камеры:

$$\beta = \frac{27 \cdot 3770 (1 - 0,75)}{0,0047 \cdot 3600} \approx 1500 \text{ кал/м}^3 \text{сек.}$$

Параметром, пропорциональным величине β , будет весовое объемное напряжение α кг/м³сек. Для камеры газификации Г-14 величина

$$\alpha = \frac{G_{\text{час}}}{V_k \cdot 3600} = \frac{27}{0,0047 \cdot 3600} = 1,6 \text{ кг/м}^3 \text{ сек.}$$

Интересно сравнить полученное тепловое напряжение газогенератора с напряжением котельных топок. Табл. 45 дает тепловые напряжения в 1000 кал/час для объема топки и площади колосниковой решетки в зависимости от системы топки и вида сжигаемого топлива.

Таблица 45
Тепловые напряжения котельных топок

Система топки	Дрова		Каменный уголь		Антрацит	
	$\frac{Q \text{ кал}}{F \text{ м}^2 \text{ час}}$	$\frac{Q \text{ кал}}{v \text{ м}^3 \text{ час}}$	$\frac{Q \text{ кал}}{F \text{ м}^2 \text{ час}}$	$\frac{Q \text{ кал}}{v \text{ м}^3 \text{ час}}$	$\frac{Q \text{ кал}}{F \text{ м}^2 \text{ час}}$	$\frac{Q \text{ кал}}{v \text{ м}^3 \text{ час}}$
Ручная колосниковая решетка	1000	350	1000	250	1000	350
Механическая топка	1100	290	1000	250	1200	300

¹ Из формулы (164) следует, что высота H активной зоны не зависит от часового расхода газа, на который рассчитывается газогенератор так как напряженность горения R и тепловая напряженность β являются постоянными величинами для выбранного вида топлива. Ред.

Из табл. 45 видно, что объемное тепловое напряжение котельной топки при работе на дровах не превышает $350\,000 \text{ кал/м}^3\text{час}$. Тот же параметр, подсчитанный для камеры Г-14, равен:

$$1500 \cdot 3600 = 5\,400\,000 \text{ кал/м}^3\text{час}.$$

Таким образом, объемное напряжение камеры газификации газогенератора в 15,4 раза больше объемного теплового напряжения котельных топок.

Характер газового потока слоя топлива зависит от его скорости. Переход от ламинарного движения к турбулентному, как уже сказано, происходит скачком при критическом значении числа Рейнольдса [см. уравнение (34)]:

$$Re = 2320.$$

Вся гидродинамическая сторона процесса газификации находится в зависимости от этого параметра. Найдем условие возникновения турбулентного газового потока в слое топлива газогенератора:

$$Re = \frac{w \cdot l}{\nu}.$$

Отсюда

$$w = \frac{Re \nu}{l},$$

где l — линейный размер. Линейный размер l , по смыслу критерия Рейнольдса, должен представлять средний промежуток кусков топлива, находящегося в камере, т. е. размер тех каналов, по которым газ движется в слое топлива.

Скорость газового потока может быть представлена также в виде следующего соотношения:

$$w = \frac{Q'_2}{F \cdot \mu} \text{ м/сек},$$

где Q'_2 — секундный отбор газа, равный

$$Q'_2 = \frac{Q_2 \left(\frac{t + 273}{273} \right)}{3600} \text{ м}^3/\text{сек},$$

F — площадь сечения камеры в м^2 .

Очевидно, оба значения скорости можно приравнять. Тогда

$$\frac{Re \nu}{l} = \frac{Q'_2}{0,785 d^2 \mu}$$

Отсюда

$$\frac{Q'_2}{d^2} = 0,785 \frac{Re \nu \mu}{l}. \quad (166)$$

Считая кинематическую вязкость воздуха при средней температуре зоны восстановления 1100° равной $\nu = 189 \cdot 10^{-6}$ и ши-

рину промежутка между кусками топлива — 5 мм, получим критическое значение $\frac{Q'_2}{d^2}$ для древесного или древесноугольного газогенератора ($\mu=0,5$):

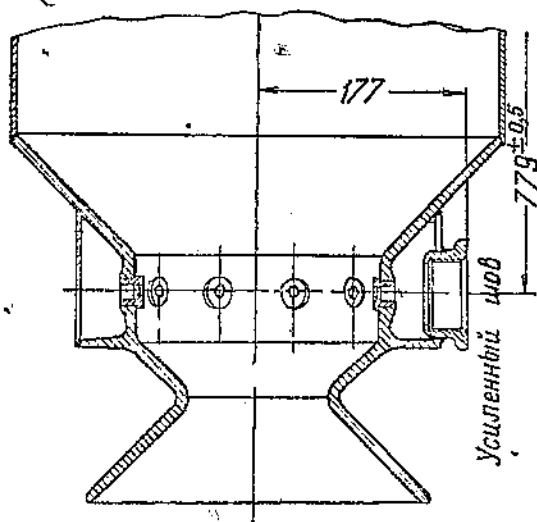
$$\frac{Q'_2}{d_1^2} = \frac{0,785 \cdot 2320 \cdot 189 \cdot 0,5}{10^6 \cdot 0,005} = 34,4 \text{ м/сек.}$$

Для камеры газификации газогенератора Г-14

$$Q'_2 = \frac{G_{\text{исп}}(L+E)(t+273)}{720 \cdot 273} = \frac{27(1,6+2,4)1373}{7200 \cdot 273} = 0,0755 \text{ м}^3/\text{сек.}$$

Диаметр нижнего сечения камеры d_k равняется 0,27 м; диаметр горловины d_0 равняется 0,12 м. Поэтому отношение $\frac{Q'_2}{d^2}$ для этих сечений будет: $\frac{0,0755}{0,0729} = 1,03$ и $\frac{0,0755}{0,0144} = 5,2$, т. е. по всей высоте камеры отношение $\frac{Q'_2}{d^2}$ меньше критического, поэтому движение газовых масс в слое топлива ламинарно.

Таким образом, можно сказать, что отношение $\frac{Q'_2}{d^2}$ может служить характеристикой газового потока.



Фиг. 25. Камера газификации Г-14.

Скорости газа в различных сечениях камеры могут быть подсчитаны, если известны часовая расход топлива и площадь сечения. Например в камере газификации газогенератора Г-14 (фиг. 25) диаметр фурменного пояса d равняется 0,2 м и $f=0,0314 \text{ м}^2$.

Если считать, что выход газа из чурок $E=2,4 \text{ м}^3/\text{кг}$, то условная скорость холодного потока газа на полное сечение будет:

$$w = \frac{G_{\text{газ}} E}{f \cdot 3600} = \frac{27,2 \cdot 2,4}{0,0314 \cdot 3600} = 0,575 \text{ м/сек.}$$

Таким образом, скорость газа в кислородной зоне генератора, работающего по редуционному режиму, близка к критической скорости, обеспечивающей переход на скоростной режим газификации. Этот неожиданный вывод приходится сделать и при анализе многих других конструкций нескоростных газогенераторов. Подробно этот вопрос будет разобран дальше.

5. Определение размеров зольника

В нижней части газогенератора, расположенной под камерой газификации, по мере выгорания топлива собираются очаговые остатки, состоящие из золы и некоторого количества С (табл. 34). Чтобы не приходилось слишком часто выгребать золу, скопленную под колосниковой решеткой, зольниковому пространству обеспечивают некоторый минимальный объем, способный вместить очаговые остатки, накапливающиеся за 8—10 час. работы генератора.

Если A — процентное содержание золы в топливе по весу, а z — потеря углерода на 1 кг золы, то при газификации 1 кг топлива останется $\frac{A}{100}$ кг золы и $\frac{A}{100} \cdot z$ углерода. При часовом расходе топлива $G_{\text{час}}$ количество очаговых остатков, скопившееся в зольнике в течение часа, будет:

$$\frac{A \cdot G_{\text{час}}}{100} + \frac{Az \cdot G_{\text{час}}}{100},$$

или

$$\frac{A}{100} \cdot G_{\text{час}} (1 + z), \text{ кг/час.}$$

Если принять интервал между чистками зольника $t_{\text{час}}$ и коэффициент расчетного «запаса» в 30%, то искомый объем зольника будет

$$V_{\text{золь}} = \frac{A G_{\text{час}} (1+z) t_{\text{час}} \cdot 1,3}{\gamma_{\text{зол}} \cdot 100} \text{ л,} \quad (167)$$

где $\gamma_{\text{зол}}$ — удельный вес очаговых остатков.

Удельный вес очаговых остатков может быть получен при делении веса очаговых остатков на занимаемый ими объем:

$$\gamma_{\text{зол}} = \frac{1+z}{\frac{1}{\gamma_z} + \frac{z}{\gamma_{\text{с}}}}, \quad (168)$$

где $\gamma_z = 0,3$ — удельный вес золы,

$\gamma_{\text{с}}$ — удельный вес углерода, который может быть принят равным 1,5.

Подставив эти значения в формулу (168), окончательно получим:

$$\gamma = \frac{(1+z)1,5}{z+5} \text{ кг/м.} \quad (169)$$

Однако при расчете зольника необходимо помнить, что роль зольникового пространства не ограничивается собиранием золы. Температура в зольнике значительно ниже, чем в камере газификации, но все-таки недостаточно низка для «закалки» газа. Например при испытании древесноугольного газогенератора Абоген с двигателем Кемпер были получены следующие температуры газа (табл. 46).

Таблица 46

Температура газа в зольнике и при выходе из генератора Абоген

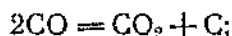
Число оборотов двигателя и об/мин	Температура газа в зольнике °Ц	Температура газа при выходе из генератора °Ц
1300	689	457
1200	772	463
1100	562	445
1000	565	445
900	549	443
750	695	435

Таблица 47

Температура газа в зольнике при работе газогенератора на чурках и на щепе

Число оборотов двигателя и об/мин	Температура газа в зольнике газогенератора в °Ц	
	при чурках	при щепе
1300	—	555
1200	553	550
1100	545	535
1000	551	535
900	537	525

Из табл. 46 видно, что при газификации древесного угля температура газа в зольнике колеблется в интервале 600—700°. Эти температурные условия чрезвычайно благоприятны для течения обратных реакций:

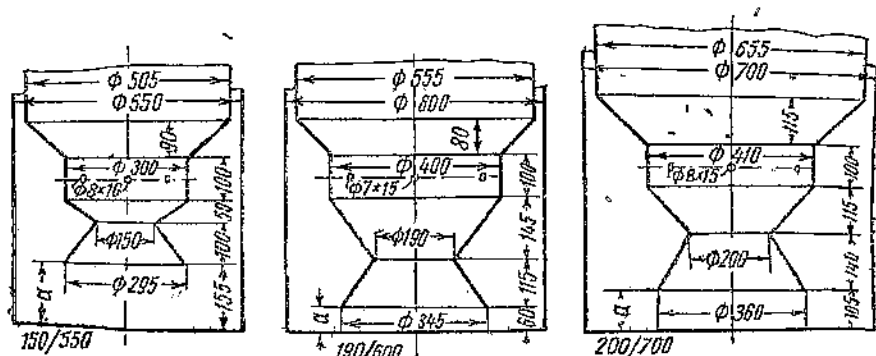


уменьшающих содержание ценных компонентов газа.

При газификации древесного топлива температура в зольнике несколько ниже (табл. 47), но и здесь могут возникнуть обратные реакции при длительном прохождении газа через «вредное пространство».

Кроме того, на работу газогенераторов большое влияние оказывает высота зольника. При недостаточном расстоянии между камерой газификации и дном зольника растет сопротивление газогенератора и, следовательно, уменьшается коэффициент наполнения двигателя. Исследователи Кюне и Кох

испытывали три газогенератора с камерой типа Берлие (фиг. 26). Опыты показали, что высота зольника является решающим фактором в определении сопротивления газогенератора (табл. 48).



Фиг. 26. Три камеры типа Берлие, испытанные Кохом и Кюне.

Таблица 48

Сопротивление газогенератора в зависимости от высоты зольника по опытам Коха и Кюне

Тип газогенератора Имберг	Высота зольника a мм	Сопротивление газогенератора в мм вод. ст.				
		$n=1300$	1200	1100	1000	900
150/550	155	165	152	137	119	90
190/600	60	225	181	179	170	122
200/700	105	116	110	100	83	70

Высоту зольника не следует делать меньше 100—110 мм, и этот минимальный размер должен быть учтен при расчете объема зольника.

6. Примерный тепловой расчет газогенератора

На основании изложенных методов теплового и конструктивного расчетов произведен примерный расчет газогенератора, предназначенного для работы с двигателем ГАЗ-АА Горьковского автозавода.

Пусть топливом для проектируемого газогенератора служат березовые чурки обычного размера. Состав органической массы древесины березы (табл. 1): 49,3% С; 6,1% Н₂; 43,6% О₂; 1% N₂. Зольность березовых чурок $A=1,1\%$. Влажность может быть принята $W=20\%$.

При испытании газогенератора Г-14 на березовых чурках с влажностью 20% один из анализов показал следующий состав.

газа: 18,78% CO; 10,92% H₂; 5,02% CH₄; 12,46% CO₂; 0,35% O₂; 52,47% N₂. Этот состав газа и принят за основу теплового расчета.

Составление материального баланса

Выбранный состав сухого генераторного газа характеризуется коэффициентом доброкачественности

$$\lambda = \frac{CO + H_2 + CH_4}{100} = \frac{18,78 + 10,92 + 5,02}{100} = 0,347.$$

Теплотворная способность 1 м³ газа при нормальных физических условиях

$$H_g = 30,35 \cdot CO + 25,7 \cdot H_2 + 85,7 \cdot CH_4;$$

$$H_g = 30,35 \cdot 18,78 + 25,7 \cdot 10,92 + 85,7 \cdot 5,02 = 1281 \text{ кал/м}^3.$$

Зная молекулярный вес компонентов газа, можно определить вес 100 кг-молей генераторного газа. Напомним, что весь тепловой расчет ведется на 100 кг-молей сухого нормального газа.

$$G_{газ} = 28 \cdot CO + 44 \cdot CO_2 + 32 \cdot O_2 + 2 \cdot H_2 + 16 \cdot CH_4 + 28 \cdot N_2.$$

Для данного состава газа

$$G_{газ} = 28 \cdot 18,78 + 44 \cdot 12,46 + 32 \cdot 0,35 + 2 \cdot 10,92 + 16 \cdot 5,02 + 28 \cdot 52,47 = 2656,5 \text{ кг.}$$

Удельный вес газа при нормальных физических условиях

$$\gamma = \frac{G_{газ}}{2240} = \frac{2656,5}{2240} = 1,18 \text{ кг/м}^3.$$

Выбрав объемное содержание компонентов газа, можно определить его элементарный состав. Содержание углерода в газе

$$C_0 = CO + CO_2 + CH_4 = 18,78 + 12,46 + 5,02 = 36,25 \text{ кг-молей};$$

водорода

$$H_0 = 2CH_4 + H_2 = 2 \cdot 5,02 + 10,92 = 20,96 \text{ кг-молей};$$

кислорода

$$O_0 = 0,5 \cdot CO + CO_2 + O_2 = 0,5 \cdot 18,78 + 12,46 + 0,35 = 22,2 \text{ кг-молей};$$

наконец

$$N_0 = N_2 = 52,47 \text{ кг-молей.}$$

Для дальнейших расчетов необходимо определить коэффициент полноты сгорания

$$\zeta' = 0,98 - \frac{Az}{C(100 - B)}.$$

Для дров $z=0,2$ (табл. 34). Балласт B равен суммарному процентному содержанию золы и гигроскопической влаги:

$$B = A + W = 21,1\%.$$

C — весовое содержание углерода в органической массе топлива в долях единицы.

$$\zeta = 0,98 - \frac{1,1 \cdot 0,2}{0,493(100 - 21,1)} = 0,974.$$

Зная коэффициент полноты сгорания, можно определить количество углерода в топливе, затраченного при получении 100 кг-молей сухого генераторного газа:

$$C_m = \frac{C_0}{\zeta} = \frac{36,26}{0,974} = 37,2 \text{ кг-молей.}$$

Вес органической массы топлива, участвующего в процессе газификации,

$$G_{орг} = \frac{C_m}{C} \cdot 12 = \frac{37,2}{0,493} \cdot 12 = 905 \text{ кг.}$$

Вес рабочего топлива

$$G_{общ} = \frac{G_{орг} \cdot 100}{[100 - (A + w)]} = \frac{905 \cdot 100}{100 - 21,1} = 1145 \text{ кг.}$$

Количество других элементов, составляющих органическую массу топлива, найдем из следующих соотношений:

$$H_m = \frac{G_{орг} \cdot h}{2} = \frac{905 \cdot 0,061}{2} = 27,6 \text{ кг-молей;}$$

$$O_m = \frac{G_{орг} \cdot o}{32} = \frac{905 \cdot 0,436}{32} = 12,3 \text{ кг-молей;}$$

$$N_m = \frac{G_{орг} \cdot n}{28} = \frac{905 \cdot 0,01}{28} = 0,323 \text{ кг-молей.}$$

Выход сухого газа из 1 кг рабочего топлива определится из соотношения:

$$E = \frac{2240}{G_{общ}} = \frac{2240}{1145} = 1,96 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

Расход первичного воздуха на газификацию 1145 кг рабочего топлива

$$L = \frac{N_0 - N_m}{0,79} = \frac{52,47 - 0,323}{0,79} = 66 \text{ кг-молей;}$$

$$L' = 66 \cdot 28,95 = 1910 \text{ кг.}$$

Вес очаговых остатков

$$G_{оч} = \frac{A}{100} \cdot G_{общ} (1 + z) = \frac{1,1 \cdot 1145 (1 + 0,2)}{100} = 15,1 \text{ кг.}$$

Количество водорода, полученного по реакции водяного газа,

$$H_{H_2O} = H_0 - H_m + 2O_m, \\ H_{H_2O} = 20,96 - 27,6 + 2 \cdot 12,3 = 17,96 \text{ кг-молей.}$$

Для определения количества паров воды, приходящихся на 100 кг-молей сухого генераторного газа, нужно составить уравнение баланса между приходом и расходом воды.

Вес гигроскопической влаги топлива

$$G'_{H_2O} = \frac{A}{100} \cdot G_{\text{общ}} = \frac{20}{100} \cdot 1145 = 229 \text{ кг},$$

или

$$G_{H_2O} = \frac{w}{1800} \cdot G_{\text{общ}} = 12,71 \text{ кг-молей}.$$

Общее содержание воды в газе

$$H_2O = G_{H_2O} - H_0 + H_m;$$

$$H_2O = 12,71 - 20,96 + 27,6 = 19,35 \text{ кг-молей},$$

или

$$H_2O' = 19,35 \cdot 18 = 348 \text{ кг}.$$

Содержание водяных паров на 1 м³ влажного генераторного газа

$$G = 0,8 \cdot \frac{H_2O}{100 + H_2O} = 0,8 \cdot \frac{19,35}{100 + 19,35} = 0,129 \text{ кг/м}^3.$$

На основании произведенных подсчетов может быть составлен материальный баланс процесса газификации:

Приход	Расход
Вес рабочего топлива . . . 1145 кг	Вес сухого генераторного газа 2655,5 кг
Вес сухого воздуха 1910 "	Вес влаги, приходящейся на 100 кг-молей газа 348
	Вес <u>очаговых остатков</u> . 15,1 "
<u>Итого</u> 3055 кг	<u>Итого</u> 3019,6 кг

Невязка в материальном балансе

$$\frac{3055 - 3019,6}{3055} \cdot 100 = 1,16\%,$$

что можно считать допустимым, так как все расчеты производились на логарифмической линейке. Но даже и при арифметической правильности расчета неувязка неизбежна из-за несоответствия анализов газа и твердого топлива.

Составление теплового баланса

При составлении уравнения теплового баланса необходимо знать время, в течение которого происходила выдача 100 кг-молей сухого генераторного газа. Кроме того, при подсчете потерь на теплопередачу нужно знать охлаждающую поверхность газогенератора. Если делается поверочный расчет существующего газогенератора, то эти данные обычно входят в комплекс за-

данных величин. При расчете новой конструкции эти величины могут быть получены, если известны основные параметры двигателя, для которого проектируется газогенератор. Двигатель Горьковского автозавода ГАЗ-АА имеет рабочий объем цилиндра $V_h = 3,28$ л. Максимальное число оборотов $n = 2200$ об/мин. Коэффициент подачи равен для этих оборотов $\eta_v = 0,78$. Тогда

$$Q_{ск} = 0,03 V_h n \eta_v = 0,03 \cdot 3,28 \cdot 2200 \cdot 0,78 = 169 \text{ м}^3/\text{час.}$$

Часовой отбор газа равен, как известно,

$$Q_2 = \frac{Q_{ск}}{1 + \alpha L_0 + \omega} \text{ м}^3/\text{час};$$

$$L_0 = \frac{1}{0,21} [0,5(\text{CO} + \text{H}_2) + 2\text{CH}_4 - \text{O}_2] \text{ м}^3/\text{час.}$$

Для выбранного состава газа

$$L_0 = \frac{1}{0,21} [0,5(0,1878 + 0,1072) + 2 \cdot 0,0502 - 0,0035] = 1,2 \text{ м}^3.$$

Коэффициент избытка воздуха двигателей, работающих на генераторном газе, колеблется от 1,05 до 1,2. Выбрав $\alpha = 1,1$ и пренебрегая влажностью газа, получим:

$$Q_2 = \frac{169}{1 + 1,1 \cdot 1,2} = 73 \text{ м}^3/\text{час.}$$

Температуру газа перед смесителем оцениваем в 30° ; разрежение — в 320 мм вод. ст.

Тогда Q_2 , приведенное к нормальным физическим условиям, будет:

$$Q'_2 = 0,36 \cdot Q_2 \cdot \frac{P_0}{P} = 0,36 \cdot 73 \cdot \frac{736,5}{308} = 64 \text{ м}^3/\text{час.}$$

Тогда

$$z = \frac{2240}{64} = 35 \text{ час.}$$

Часовой расход топлива будет:

$$G_{\text{час}} = \frac{G_{\text{обц}}}{z} = \frac{1145}{35} = 32,8 \text{ кг/час.}$$

Если принять объемный вес чурок $B = 300$ кг/м³, то часовой запас топлива занимает объем:

$$\frac{32,8}{300} = 0,109 \text{ м}^3.$$

Приняв объем бункера равным объему, занимаемому 1,5-часовым запасом топлива, окончательно получим:

$$V_6 = 1,5 \cdot 0,109 = 0,1635 \text{ м}^3.$$

Площадь сечения камеры газификации в плоскости фурм определим по формуле

$$F = \frac{G_{\text{час}}}{R} \text{ м}^2.$$

Выбрав $R=900 \text{ кг/м}^2\text{час}$, получим:

$$F = \frac{32,8}{900} = 0,0365 \text{ м}^2,$$

откуда

$$d = 1,13 \sqrt{F} = 1,13 \sqrt{0,0365} = 0,216 \text{ м}.$$

Считая диаметр бункера 0,45 м, определим высоту бункера:

$$H_6 = \frac{0,1635}{0,785 \cdot 0,45^2} = 1,03 \text{ м}.$$

Принимая примерную высоту камеры газификации 300 мм и высоту зольникового пространства 120 мм, получим общую высоту газогенератора 1450 мм. Определив основные габариты газогенератора, можно перейти к составлению теплового баланса. Приход тепла от экзотермических реакций, протекающих в активной зоне, будет:

$$U_{\text{экз}} = U_{\text{CO}_2} + U_{\text{CO}} + U_{\text{CH}_4};$$

$$U_{\text{CO}_2} = 97\,200 \cdot 12,46 = 1\,211\,110 \text{ кал};$$

$$U_{\text{CO}} = 29\,217 (\text{CO} - H_{\text{H}_2\text{O}}) = 29\,217 (18,78 - 17,96) = 23\,950 \text{ кал};$$

$$U_{\text{CH}_4} = 20\,368 \cdot 5,02 = 102\,000 \text{ кал}.$$

Общий приход тепла от экзотермических реакций сгорания углерода CO, CO₂ и образования CH₄ будет:

$$U_{\text{экз}} = 1\,337\,060 \text{ кал}.$$

Так как специальный подогрев первичного воздуха конструкцией не предусмотрен, то на этом кончаются приходные статьи теплового баланса¹. К расходным статьям баланса относятся в первую очередь расход на эндотермическую реакцию водяного газа:

$$U_{(\text{CO}+\text{H}_2)} = 28\,351 \cdot H_{\text{H}_2\text{O}} = 28\,351 \cdot 17,96 = 510\,000 \text{ кал}.$$

Расход тепла на испарение воды:

$$U_s = 10\,710 (G_{\text{H}_2\text{O}} + 2O_m + G_{\text{пр}}) = 10\,710 (12,71 + 2 \cdot 12,3) = 399\,590 \text{ кал}.$$

Для подсчета потери на теплоотдачу необходимо задаться температурами поверхности газогенератора. Для древесного газогенератора с обогревом бункера могут быть выбраны следующие температуры:

Верхняя крышка газогенератора . . .	100°
Нижнее дно . . .	170°
Верхняя часть боковой поверхности . . .	90°
Средняя часть . . .	250°
Нижняя . . .	190°
Средняя температура боковой поверхности (получено по расчету)	178°

¹ Распад клетчатки твердого топлива согласно Менделееву сопровождается выделением тепла в количестве 18 400 кал на каждую кг-молекулу воды Дюлонга, что в пересчете на 100 молей сухого газа составит 11,5 $C_{\text{общ}}$ О кал/100 кг-молей, где О — весовое содержание O₂ в рабочем топливе. Это тепло должно входить в статью прихода теплового баланса. Ред.

Тепло, переданное окружающей среде цилиндрической частью газогенератора, может быть подсчитано по формуле Рамбуша, дающей суммарные потери на конвекцию и лучеиспускание¹. Принимая температур воздуха $t_0 = 20^\circ$ и среднюю температуру поверхности $t_n = 178^\circ$, получим:

$$U_{охл}^{б.п.} = 2,8(451^4 - 293^4) \cdot 10^{-8} + 3,5(178 - 20)^{1,23} = 2695 \text{ кал/м}^2 \text{ час.}$$

Площадь цилиндрической поверхности

$$F = \pi d \cdot H = 3,14 \cdot 0,450 \cdot 1,45 = 2,05 \text{ м}^2.$$

Поэтому $U_{охл}$ для цилиндрической части газогенератора будет:

$$U_{охл}' = 2695 \cdot 2,05 \cdot 35 = 189\,500 \text{ кал.}$$

Конвекционные потери верхнего днища равны

$$U_k' = kF(t - t_0)z,$$

где

$$k = \alpha \sqrt[4]{t - t_0} = 1,75 \sqrt[4]{100 - 20} = 5,22;$$

$$F = \frac{\pi d^2}{4} = 0,785 \cdot 0,45^2 = 0,159.$$

Тогда

$$U_k' = 5,22 \cdot 0,159 (100 - 20) 35 = 2320 \text{ кал.}$$

Для нижнего днища

$$k = \alpha \sqrt[4]{t - t_0} = 1,75 \sqrt[4]{170 - 20} = 6,14.$$

Конвекционные потери для нижнего днища

$$U_k'' = 6,14 \cdot 0,159 (170 - 20) 35 = 5140 \text{ кал.}$$

Потери на лучеиспускание верхним днищем

$$U_s' = FCZ \left(\frac{T}{100} \right)^4 = 0,159 \cdot 3,26 \cdot 35 \left(\frac{373}{100} \right)^4 = 3550 \text{ кал.}$$

Потери на лучеиспускание нижним днищем газогенератора могут быть подсчитаны по аналогичной формуле, так как у большинства современных установок газогенератор находится в подвешенном состоянии и достаточно высоко над землей:

$$U_s'' = 0,150 \cdot 3,26 \cdot 35 \left(\frac{443}{100} \right)^4 = 6920 \text{ кал.}$$

Таким образом, общие потери на охлаждение составляют:

$$U_{охл} = 189\,500 + 2320 + 5140 + 3550 + 6920 = 207\,430 \text{ кал.}$$

¹ Для автомобильных газогенераторов коэффициент теплопередачи лучше определять формулой, учитывающей влияние скорости движения охлаждающего воздуха, например формулой Молье, где $K = 2 + 10\sqrt{v}$ кал/м² час. В данном случае v будет представлять максимальную скорость автомобиля в м/сек. Р е д.

Физическое тепло газа, выходящего из газогенератора, может быть найдено из теплового баланса:

$$U_{CO_2} + U_{CO} + U_{CH_4} = U_{(CO+H_2)} + U_s + U_{охл} + U_z.$$

Подставляя найденное значение, получим:

$$1\,337\,060 = 510\,000 + 399\,590 + 207\,430 + U_z.$$

откуда

$$U_z = 220\,040 \text{ кал.}$$

Для определения температуры генераторного газа необходимо определить среднюю молекулярную теплоемкость продуктов газификации. В начале теплового расчета мы задались объемным содержанием сухого генераторного газа. Однако гигроскопическая влага и химическая вода, полученная при горении топлива, только частично расходуется на реакцию водяного газа. Поэтому для определения средней молекулярной теплоемкости необходимо иметь объемный состав влажного газа:

$$W^{до-ам} = \frac{H_2 + O_2 + CO + N_2}{100 + H_2O} = \frac{10,92 + 0,35 + 18,78 + 52,47}{100 + 19,35} = 0,691;$$

$$W^{CO_2} = \frac{CO_2}{100 + H_2O} = \frac{12,46}{100 + 19,35} = 0,105;$$

$$W^{CH_4} = \frac{CH_4}{100 + H_2O} = \frac{5,02}{100 + 19,35} = 0,042;$$

$$W^{H_2O} = \frac{H_2O}{100 + H_2O} = \frac{19,35}{100 + 19,35} = 0,162.$$

Средняя молекулярная теплоемкость молекулярного газа получится как сумма следующих слагаемых:

$$W^{до-ам} m C_p^{до-ам} = 0,691 (6,83 + 0,0006t) = 4,72 + 0,000414t;$$

$$W^{CO_2} m C_p^{CO_2} = 0,105 (8,7 + 0,0026t) = 0,913 + 0,000273t;$$

$$W^{CH_4} m C_p^{CH_4} = 0,042 (9,78 + 0,006t) = 0,411 + 0,000252t;$$

$$W^{H_2O} m C_p^{H_2O} = 0,162 (8,24 + 0,000832t) = 1,335 + 0,000135t.$$

откуда

$$(m C_p)_{cp} = 7,379 + 0,001074t.$$

Температура газа, выходящего из генератора, найдется из уравнения:

$$U_z = (m C_p)_{cp} \cdot (100 + H_2O) t_z.$$

Подставляя найденные значения, получим:

$$220\,040 = (7,379 + 0,001074t_z) (100 + 19,35) t_z.$$

Решая это квадратное уравнение относительно температуры газа, получим:

$$t_z = 254^\circ.$$

VI. О ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ГАЗОГЕНЕРАТОРА И ДВИГАТЕЛЯ

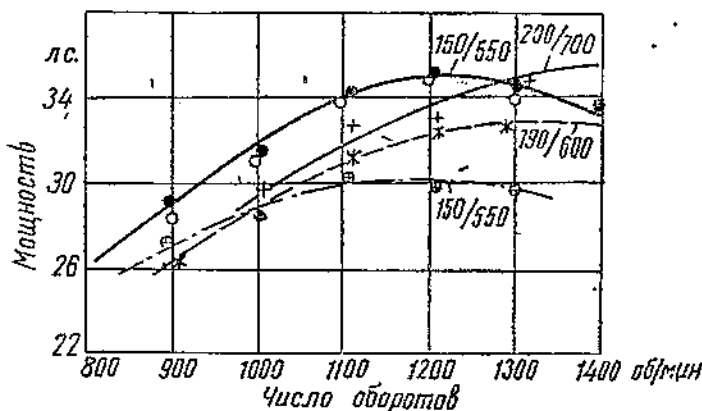
1. О соответствии газогенератора двигателю

Правильно спроектированная газогенераторная установка является не просто суммой отдельных агрегатов, а представляет единую гармоничную систему. Отдельные компоненты этой системы, участвующие в общем рабочем процессе, должны соответствовать друг другу. Вопрос о соответствии газогенератора двигателю чрезвычайно важный, но, к сожалению, еще недостаточно полно разработанный.

Обычно при расчете газогенератора в настоящее время устанавливают его производительность по двигателю. Зная число оборотов и литраж двигателя, можно найти нужную производительность газогенератора. Но соответствует ли данный газогенератор двигателю? Является ли данная интенсивность отбора газа для генератора оптимальной? На эти вопросы приведенный расчет ответа, конечно, дать не может.

Материал относительно соответствия газогенератора двигателю имеется в книге Кюне и Коха „Испытание автомобильных газогенераторов“.

При испытании двигателя Кемпер с газогенераторами, отличающимися друг от друга размерами топливников (фиг. 26), были получены различные внешние характеристики, несмотря на то, что установки работали на одинаковом топливе (фиг. 27). Несовпадение внешних характеристик Кох и Кюне вполне правильно объяснили несоответствием между газогенератором и двигателем, но воздержались от дальнейшего анализа.



Фиг. 27. Внешние характеристики двигателя Кемпер при работе с газогенератором Имберт различных типов.

Причина несовпадения внешних характеристик в опытах Кюне заключается в том, что все три газогенератора работали на разных режимах и, следовательно, в различной степени со-

ответствовали двигателю. Несмотря на одинаковые отборы газа, параметры, характеризующие тепловое напряжение газогенератора, скорость газа в слое топлива и время контакта у камер получались различными.

Как изменились эти параметры при замене газогенераторов в опытах с двигателем Кемпер? Прежде чем ответить на этот вопрос, рассмотрим две цилиндрические геометрически подобные камеры, у которых отношение

$$\frac{H}{h} = \frac{D}{d} = n,$$

где H и h — высоты активных зон,
 D и d — их диаметры.

При сохранении одного из параметров ($G_{\text{газ}}$, R , β , τ или w), равным для обеих камер отношение других параметров меняется. В табл. 49 даны результаты соответствующих подсчетов.

Таблица 49

Зависимость между параметрами геометрически подобных камер

Отоношение параметров Постоянные	$\frac{G_1}{G_2}$	$\frac{\alpha_1}{\alpha_2}$	$\frac{R_1}{R_2}$	$\frac{\tau_1}{\tau_2}$	$\frac{w_1}{w_2}$	$\frac{Q_1}{Q_2}$
G кг/час	1	$1/n^3$	$1/n^2$	n^3	$1/n^2$	1
R кг/м ² час	n^3	$1/n$	1	n	1	n^2
α кг/м ³ час	n^3	1	n	1	n	n^3
τ сек.	n^3	1	n	1	n	n^3
w м/сек	n^2	$1/n$	1	n	1	n^2

Из таблицы видно, что при изменении размеров активной зоны отношение параметров не всегда остается равным отношению соответствующих размеров камер газификации. Например, если сохранить отбор газа постоянным (что и имело место в опытах Коха и Кюне) и изменить размеры камеры в отношении n , то отношение объемных напряжений будет равно $\frac{1}{n^3}$, отношение напряжений зеркал горения $\frac{1}{n^2}$ и т. д.

Следовательно, если отношение параметров, определяющих протекание процесса, изменилось по-разному, то и самый процесс должен измениться, и значит, геометрическое подобие активных зон ни в коей мере не определяет подобия процессов газификации.

Вернемся к опытам Коха и Кюне. Испытания двигателя Кемпер с тремя различными газогенераторами как раз соответ-

ствуют случаю, когда из всех параметров остаются равными только часовые расходы топлива. В табл. 50 даны результаты таких подсчетов для всех трех камер при максимальной мощности. В этой же таблице даны для сравнения те же параметры для газогенераторов ЗИС-21 и Г-14, также работающих на древесных чурках.

Таблица 50

Сравнения параметров различных газогенераторов при максимальной нагрузке

Характеристические величины и параметры	Газогенераторы, испытанные Кохом и Кюне			ЗИС-21	Г-14
	1	2	3		
V_{K1} л	9,61	22,5	24,3	12,5	4,7
N_{e1} л. с. (максим.)	35,1	32,3	33,3	48	30
$V_{y0} = \frac{v_k}{N_c}$	0,271	0,698	0,731	0,260	0,157
$F, м^2$ (в плоскости фурм)	0,0707	0,1256	0,1320	0,0907	0,0314
$f, м^2$ (горловина)	0,0175	0,0283	0,0314	0,0200	0,0113
f/F	0,248	0,226	0,238	0,220	0,360
G кг/час	31,5	29,2	30	43	27
R кг/м ³ час (вне фурм)	445	238	227	475	850
R кг/м ³ час (горловина)	1800	1030	957	2150	2400
a кг/м ³ час	0,92	0,36	0,34	0,95	1,6
Q'_B м ³ /час с. н. г.)	75,6	70	72	103	65
τ сек.	0,0455	0,115	0,1215	0,04375	0,026
w м/сек (при выходе из камеры)	3,1	2,08	1,95	3,36	3,16

Из таблицы видно, что все три газогенератора работают на разных тепловых режимах. Это и послужило причиной несовпадения внешних характеристик в опытах исследователей¹. Интересно отметить, что первый газогенератор, давший лучшие результаты, ближе всего подходит по параметрам к советским серийным машинам ЗИС-21 и Г-14 (ГАЗ-42).

При анализе опытов Кюне и Кох следует учесть, что кроме камер газогенераторы отличались размерами бункеров и, следовательно, степенью подогрева топлива в них. Помимо этого размеры и количество фурм были тоже различными.

Анализ параметров ЗИС-21 и Г-14 приводит к выводу, что эти древесные газогенераторы, работающие по редукционному режиму с восстановительной зоной, по существу являются

¹ Наличие скоростного процесса в транспортных газогенераторах объясняется подводом воздуха через фурмы со скоростью 30 — 40 м/сек, а не скоростью выхода газа из камеры (3,36 и 3,16 м/сек), хотя эти опыты и соизмеримы. Ред.

скоростными газогенераторами. В самом деле, при полной нагрузке скорость выхода газа из нижнего сечения камеры газификации равна у них 3,36 и 3,16 м/сек, что составляет 0,336 и 0,316 м/сек при расчете на холодное дутье и полное сечение. Согласно опытам Гродзовского и Чуханова такая скорость выхода газа при газификации древесного угля обеспечивает достаточное содержание CO (табл. 51). Однако сопоставление опытов Гродзовского с работой транспортных газогенераторов должно производиться с осторожностью, так как размер кусков топлива в обоих случаях не совпадает.

Таблица 51

Влияние скорости дутья на состав газа по опытам Гродзовского и Чуханова

Топливо	Скорость дутья при расчете на холодный воздух и полное сечение, м/сек									
	0,25		0,5		0,75		1,0		1,5	
	CO	CO ₂	CO	CO ₂	CO	CO ₂	CO	CO ₂	CO	CO ₂
Древесный уголь частицы 1,8—2,7 мм	25	5	29	3,5	30	2	30,5	1,75	31,5	1,5
Активный древесный уголь 2—3 мм	23	5	29	3	30	2	30,5	1,75	31	1,75
Электродный уголь 1,8—2,7 мм	18	10	23	8,5	25	7	26	6	27	4
Подмосковный уголь	—	—	10,5	12,5	20	18	25	6	28	4
Торф	15	5	12	13,5	17,5	4	24	9	28	7

Таким образом, отпадает необходимость в дальнейших восстановительных реакциях. Время контакта газа с топливом, достигнутое при максимальной мощности 0,043 и 0,026 сек., также подтверждает скоростной характер процесса.

Так же как и двигатель, каждый газогенератор имеет свою характеристику, определяемую целым комплексом конструктивных особенностей агрегата. Этой характеристикой может быть названа зависимость

$$H_u'' = f(Q),$$

где Q — расход газа в м³/час.

С увеличением интенсивности отбора газа растёт часовой

расход топлива в генераторе, следовательно, растёт объёмное напряжение активной зоны:

$$\alpha = \frac{G_{\text{газ}}}{V_k \cdot 3600} \text{ кал/м}^3 \text{сек}$$

и

$$\beta = \alpha h_u (1 - \eta_p) \text{ кал/м}^3 \text{сек}. \quad (170)$$

Однако тепловое напряжение камеры β растёт не прямо пропорционально α , а несколько медленнее, так как до некоторого предела одновременно с α растёт и к. п. д. процесса газификации. С увеличением теплового напряжения растёт и количество физического тепла, выделившееся в активной зоне в единицу времени

$$q_0 = \beta V_k \cdot 3600 \text{ кал/час}. \quad (172)$$

Выделившееся тепло, как уже сказано, является избыточным членом теплового баланса газогенератора — итогом всех экзотермических и эндотермических реакций процесса газификации и может быть отдано окружающей среде путем теплоотдачи, а также перейти в физическое тепло отводимого из генератора газа. Таким образом,

$$q_0 = q_1 + q_2, \quad (172)$$

где q_1 — тепло, отданное через стенки камеры,
 q_2 — физическое тепло газа.

Тепло q_0 , выделяющееся в камере, частично расходуется на подогрев топлива в бункере путём излучения и конвекции через зеркало горения. Поэтому формула $q_0 = q_1 + q_2$ имеет приближенный смысл.

Очевидно,

$$q_1 = \kappa \varphi V_k \Delta t, \quad (173)$$

где κ — коэффициент теплопередачи,

φ — удельная поверхность активной зоны;

$$\varphi = \frac{F}{V_k} \text{ м}^2/\text{м}^3. \quad (174)$$

Здесь F — поверхность стенок активной части камеры,

V_k — объём камеры газификации,

Δt — перепад температур.

Физическое тепло газа может быть найдено по формуле:

$$q_2 = G_{\text{газ}} E C_p (t_z - t_0) \text{ кал/час}. \quad (175)$$

Здесь C_p — объёмная теплоёмкость влажного газа при постоянном давлении,

t_z — температура газа при выходе из камеры,

t_0 — температура наружного воздуха,

E — выход влажного газа из 1 кг топлива.

С увеличением интенсивности отбора теплоотдача растет медленнее, чем физическое тепло газа, и температура продуктов газификации повышается. Одновременно растет и средняя температура активной зоны. В случае газификации древесного угля (т. е. бессмольного топлива) интенсивность отбора может быть сильно повышена. Отношение $\text{CO}:\text{CO}_2$ будет постепенно увеличиваться и достигнет некоторого оптимального значения. Чем больше величина объемного напряжения камеры или чем меньше удельный объем активной зоны, тем скорее растет H_u в характеристике газогенератора $H_u = f(Q)^1$.

Но, помимо увеличения содержания CO с увеличением интенсивности отбора растет и сопротивление газогенератора (табл. 8). Сочетание кривых $H_u = f(Q)$ и $h = f'(Q)$, где h — сопротивление газогенератора, определяет внешнюю характеристику двигателя, работающего на генераторном газе (фиг. 28).

В самом деле, индикаторная мощность двигателя может быть выражена следующей формулой:

$$N_i = \left(\frac{H_u}{1 + \alpha L_0} \right) V_n \eta_v \eta_i \times \\ \times n \frac{427}{2 \cdot 60 \cdot 75} \text{ л. с.}, \quad (176)$$

где α — коэффициент избытка воздуха,

L_0 — количество воздуха, необходимое для сгорания 1 м^3 газа,

η_v — коэффициент наполнения,

η_i — индикаторный к. п. д.

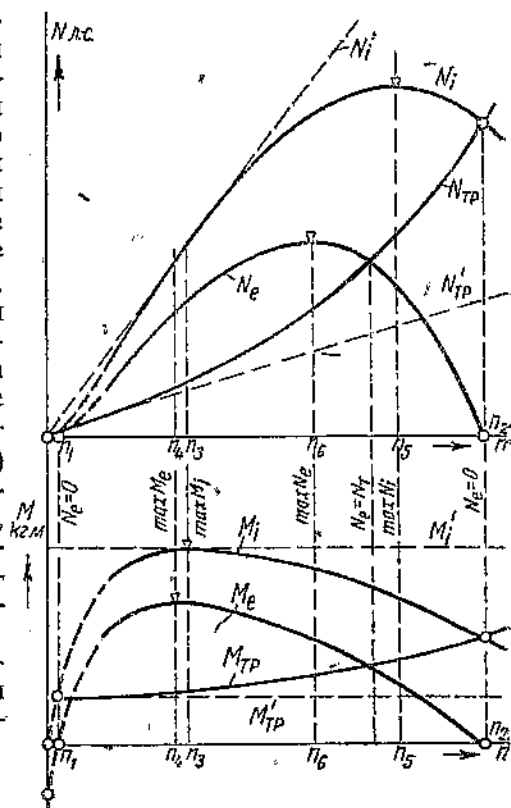
Если принять η_i постоянным по числу оборотов, то формуле (176) можно придать несколько иной вид:

$$N_i = k H_u'' \eta_v n, \quad (177)$$

где k — постоянный коэффициент пропорциональности².

¹ Как показывают опыты, кривая $H_u = f(Q)$ в транспортных газогенераторах с фурманной подачей воздуха не имеет максимума и возрастает асимптотически. Ред.

² При изменении качества газа (H_u) $L_0 \neq \text{const}$, и, следовательно, величину k только с известным приближением можно считать постоянной. Ред.



Фиг. 28. Схема внешней характеристики.

Если бы теплотворная способность газа и коэффициент наполнения не изменялись по числу оборотов, то, выражение (177) представляло бы уравнение прямой в системе координат $N_i - n$, но с увеличением числа оборотов коэффициент наполнения меняется, достигая некоторого максимума, не совпадающего с максимумом кривой $N_i = f(n)$ (фиг. 29). Если считать, что $H_u = \text{const}$, то уравнение (177) может быть упрощено:

$$N_i = k \eta_v n. \quad (178)$$

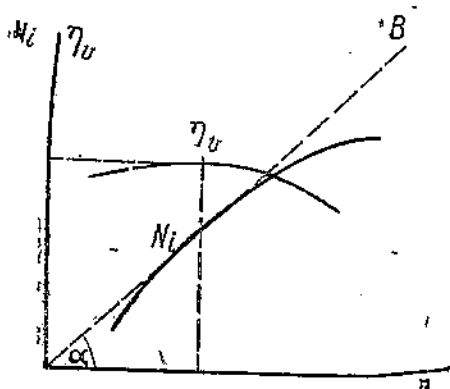
Дифференцируя это уравнение по числу оборотов и приравнявая производную нулю, можно определить максимум кривой $N_i = f(n)$:

$$\frac{dN_i}{dn} = k \left(\frac{d\eta_v}{dn} \cdot n + \eta_v \right);$$

$$\frac{d\eta_v}{dn} \cdot n + \eta_v = 0;$$

$$-\frac{d\eta_v}{dn} = \frac{\eta_v}{n};$$

$$\left(-\frac{\Delta \eta_v}{\Delta n} \right) = \frac{\eta_v}{n}, \quad (179)$$



Фиг. 29. Зависимость индикаторной мощности и коэффициента наполнения от числа оборотов.

т. е. максимум мощности достигается в тот момент, когда отношение отрицательного приращения (уменьшения) коэффициента наполнения к приращению числа оборотов будет равно отношению коэффициента наполнения к числу оборотов.

Например если двигатель при $n = 2000$ об/мин имеет $\eta_v = 0,85$, а $\Delta n = 100$ об/мин, то

$$\Delta \eta_v = - \frac{0,85 \cdot 100}{2000} = -0,0425,$$

т. е. максимум мощности находится на участке характеристики $N_i = f(n)$, где η_v начинает падать на 4,25% на каждые 100 об/мин. Сопротивление газогенераторной установки в большинстве случаев выше сопротивления карбюратора, поэтому при переводе двигателя на генераторный газ при том же числе оборотов коэффициент подачи будет несколько ниже. Предположим, что для того же двигателя, работающего на генераторном газе, при 2000 об/мин $\eta_v = 0,78$. Тогда

$$\Delta \eta_v = - \frac{0,78 \cdot 100}{2000} = -0,039,$$

т. е. максимум мощности в этом случае находится на участке кривой, где при увеличении числа оборотов на 100 об/мин η_v начинает падать на 3,9%.

Совершенно очевидно, что уменьшение коэффициента подачи на 3,9% на каждые 100 об/мин должно соответствовать меньшим

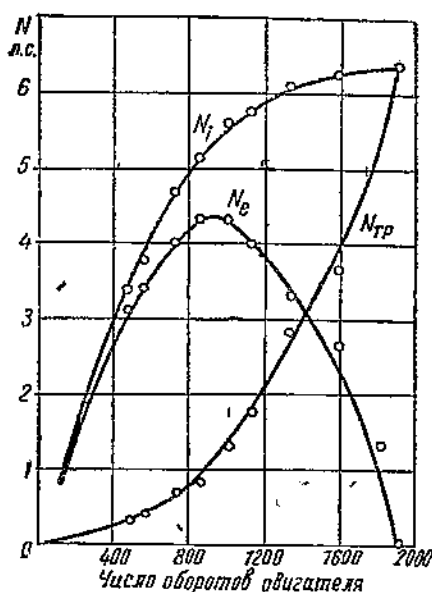
оборотах двигателя, чем уменьшение η_e на 4,25%. Поэтому при переводе двигателя на генераторный газ максимум мощности должен сместиться в область меньших оборотов (фиг. 30). Если этого иногда не наблюдается, то лишь потому, что в нашем выводе мы игнорировали другой фактор, а именно изменение теплотворной способности газа. Положение максимума кривой $N_e = f(n)$ и является результатом борьбы этих двух факторов, влияющих на величину индикаторной мощности агрегата.

Если при переводе двигателя с бензина на газ степень сжатия остается без изменения, то максимум эффективной мощности всегда лежит в зоне более низких оборотов. Возвращение максимума эффективной мощности при работе на газе в зону нормальных для бензина оборотов происходит при переходе на повышенную степень сжатия. Нам даже известен случай, когда двигатель М-1 при работе на газе со степенью сжатия порядка $\epsilon=7$ имел максимум мощности при 3200 об/мин (вместо обычных для бензина 2800 об/мин), причем эффективная мощность достигла 41,5 л. с.

Аналогично этому число оборотов вала, соответствующее максимуму эффективной мощности, зависит от характера влияния интенсивности отбора газа на теплотворную способность рабочей смеси и сопротивления газогенераторной установки. Поэтому правильнее говорить не о соответствии газогенератора двигателю, а о соответствии газогенераторной установки (т. е. всего комплекса агрегатов) двигателю. Изменение конструкции очистителя или смесителя может нарушить правильное соотношение указанных факторов и переместить максимум эффективной мощности в нежелательную зону оборотов.

Таким образом, условия соответствия газогенератора двигателю заключаются в том, чтобы: 1) максимум кривой $N_e = f(Q)$ находился в зоне рабочих оборотов двигателя, 2) величина n в зоне рабочих оборотов двигателя не превышала норм, установленных практикой.

Характеристика типа $N_e = f(Q)$, являясь необходимым средством изучения данного агрегата, имеет, однако, тот органический недостаток, что результаты ее не могут быть обобщены полностью. Полученная кривая отражает только индивидуальные



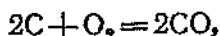
Фиг. 30. Кривые внешней характеристики.

особенности данной конструкции и не может быть произвольно перенесена на другой генератор.

2. Предельная нагрузка

Влияние режима двигателя на работу газогенератора сказывается в основном в изменении интенсивности отбора газа. Вопрос о предельной нагрузке газогенератора имеет большое практическое значение. Какие факторы могут ограничить увеличение расхода газа? Можно ли газогенератор, рассчитанный на определенный двигатель, безнаказанно монтировать с агрегатом, мощность которого заведомо больше расчетной?

Согласно опытным данным, при температуре больше 800—900° горение углерода идет в основном по реакции



причем с увеличением скорости газа в слое топлива выше 0,5—1 м/сек (в зависимости от крупности кусков топлива) ухудшения состава газа не наблюдается. Скорость реакций горения углерода пропорциональна концентрации кислорода в дутье в степени 1,6. Ввиду того что при температуре 900—1000° скорость рассматриваемой химической реакции чрезвычайно велика, суммарная скорость процесса горения определяется физическими факторами и практически может быть принята пропорциональной линейной скорости газового потока в слое топлива. Как уже было указано, при скоростях дутья, приближающихся к скорости звука, выход газа с нормальным содержанием СО не прекращается. Время контакта газа с топливом активного слоя не превышает при этом 0,002 сек. Тепловое напряжение зеркала горения, соответствующее этим скоростным режимам, может в 50 раз превысить тепловое напряжение нормальных газогенераторов.

Таким образом, при газификации древесного угля предел нагрузки газогенераторов определяется не процессом газообразования¹. Пределом интенсификации газогенераторного процесса может стать допустимое тепловое напряжение камеры, соприкосновение газогенератора и т. д.

При газификации древесного топлива помимо этих факторов, определяющих предельную нагрузку газогенераторов, придется отметить еще два других имеющих большое значение: скорость образования древесного угля (т. е. скорость переугливания) и скорость сгорания и крекинга смол. При образовании генераторного газа происходит, как известно, ряд гетерогенных реакций на поверхности топлива. Три компонента газовой смеси, составляющей генераторный газ, содержат углерод в одинаковых количествах. Эти компоненты — СО, СО₂ и СН₄. При образовании 1 моля этих газов расходуется (как это видно из уравнения

¹ Это замечание справедливо для скоростей выхода воздуха из фурм или газа в слое, превышающих критическую, т. е. такую, при которой наступает скоростная газификация, Ред.

реакции) 1 моль С, и, следовательно, 1 м³ СО, СО₂ или СН₄ содержит

$$\frac{12}{22,4} = 0,536 \text{ кг/м}^3 \text{ углерода.}$$

Так как образование этих газов происходит в основном на поверхности раскаленного древесного угля (если пренебречь газом, получающимся в зоне сухой перегонки), то очевидно, что скорость переугливания чурок не должна быть меньше скорости газификации угля. В противном случае высота слоя древесного угля может уменьшиться и качество газа резко ухудшится. Нагрузка, при которой достигается равновесие между скоростями образования и выгорания угля, очевидно, и будет предельной.

Количество топлива, затраченное на образование 1 м³ газа, может быть подсчитано по следующей формуле:

$$g = \frac{0,5 \cdot 6 \cdot a}{\xi C \cdot 100} \text{ кг/м}^3, \quad (190)$$

где a — процент содержания СО + СО₂ + СН₄ в газе,

ξ — коэффициент полноты сгорания,

C — весовая доля углерода в рабочем топливе.

Значения величин, входящих в формулу (190), в зависимости от влажности топлива даны в табл. 52, составленной на основании теоретических расчетов состава газа, произведенных Шлепфером и Тоблером.

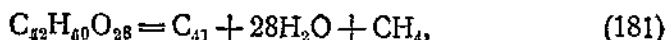
Таблица 52

Влияние влажности древесины на процесс газификации
(по расчетам Шлепфера и Тоблера)

W %	Состав газа в объемных процентах					Содержание воды после генератора в кг/кг	Содержание углерода в газе в кг/м ³	Весовая доля углерода в рабочем топливе	Расход топлива на 1 м ³ газа $D = \frac{1}{E} \text{ кг/м}^3$	Выход газа $E = \frac{1}{D}$	Скорость опускания топлива в цилиндрической части камеры ЗМС-21 при $Q = 100 \text{ м}^3/\text{кг}$ см/мин
	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	N ₂						
0	18	24,6	9,6	1,5	46,3	0,093	0,193	0,487	0,404	2,47	2,56
9,1	19,5	21,2	11,9	1,5	45,9	0,136	0,186	0,442	0,43	2,33	2,75
16,7	20,6	18,5	13,8	1,4	45,7	0,178	0,181	0,404	0,457	2,19	2,89
28,6	21,6	14,2	16,5	1,4	46,3	0,262	0,172	0,346	0,510	1,96	3,23
35,5	21,8	11,9	17,9	1,3	47,1	0,320	0,167	0,312	0,546	1,83	3,46
50	20,8	7,3	20,5	1,3	50,1	0,468	0,156	0,242	0,66	1,52	4,05
66,7	15,0	2,9	22,1	1,1	58,9	0,680	0,139	0,159	0,875	1,44	4,28

Как видно из таблицы, с увеличением влажности топлива содержание углерода в газе снижается, но уменьшается также и весовая доля углерода в рабочем топливе. В результате расход топлива на 1 м³ газа растет и, следовательно, выход газа падает. Поэтому при заданном постоянном отборе газа необходимая скорость обугливания с увеличением влажности также растет. В табл. 52 даны скорости опускания топлива в цилиндрической части камеры газификации ЗИС-21 при отборе в 100 м³/час. Эта скорость обратно пропорциональна выходу газа. Но увеличение скорости опускания топлива означает уменьшение времени переугливания, процесс же переугливания влажного топлива более длителен. Следовательно, чем больше влажность топлива, тем меньше предельная нагрузка газогенератора¹.

Представим себе, что влажность древесного топлива такова, что, несмотря на увеличение отбора газа, скорость переугливания равна или больше скорости выгорания угля. В этом случае фактором, ускоряющим достижение предельной нагрузки, является выход угля. Согласно исследованиям Классона, Пальмера, Коробкина и др. с увеличением скорости обугливания выход древесного угля уменьшается. Этот факт можно объяснить следующим образом. Максимальный выход угля получился бы в том случае, если весь O₂, содержащийся в органической массе древесины, мог перейти в химическую воду. Этот процесс, выражающийся уравнением



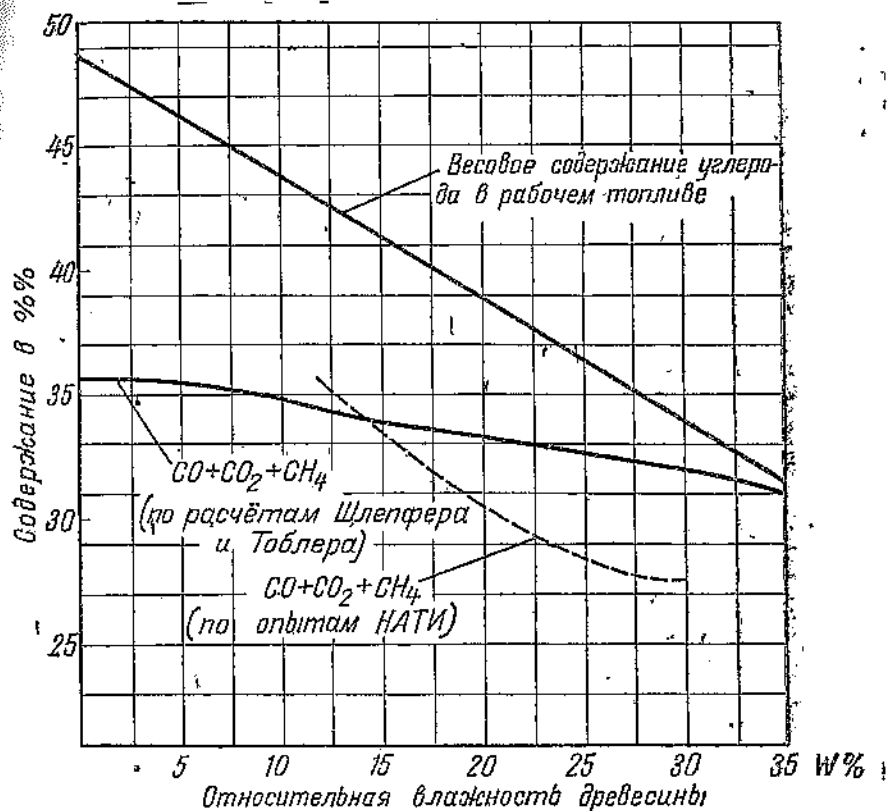
мог бы произойти только при очень медленном течении реакции.

Чем быстрее идет обугливание древесины, тем большее количество O₂ соединяется с C, давая CO₂ и CO. Увеличение скорости выгорания и уменьшение скорости выхода угля неизбежно приведет к уменьшению объема активного слоя. Это уменьшение слоя окажет на количество, смолы в газе лишь косвенное влияние, так как основным фактором, влияющим на степень очистки газа от продуктов сухой перегонки, является температура слоя².

Интересно отметить, что расчетные данные Шлепфера и Тоблера не вполне совпадают с опытными данными НАТИ, которые дают несколько другую зависимость выхода газа от влажности топлива. Нам кажется, зависимость, полученная в опытах НАТИ, более правильной, однако это ничего не меняет в наших предыдущих выводах (фиг. 31 и табл. 53).

¹ На практике при работе не на предельных нагрузках наблюдается обратное. Когда топливо имеет повышенную влажность, снижение расхода газа при холостой работе двигателя приводит к его полной остановке и невозможности повторного пуска, так как газ перестает гореть. Ред.

² Для крекинга смол не требуется их соприкосновения с поверхностью угля. Скорость крекинга смол зависит от температуры газового потока, с которым смоляные пары движутся в слое. При температуре 1100—1200° смолы крекируются достаточно полно. Чтобы получить крекинг смол, нужно разрешить аэродинамику газового потока, заставив смоляные пары пройти через зону наиболее нагретых газов, например при помощи специального сужения камеры — горловины. Ред.



Фиг. 31. Сравнение результатов расчета Шлеппера и Тоблера с опытными данными НАТИ.

Таблица 53

Влияние влажности древесины на процесс газификации по данным НАТИ

$W\%$	a ($CO+CO_2+CH_4$)% по объему	Содержание углерода в 1 м ³ в кг/м ³	Весовая доля углерода в рабочем топливе	D кг/м ³ при $\zeta = 0,98$	Выход газа $E = \frac{1}{D}$ м ³ /кг	Скорость опускания топлива в цилиндрической части камеры ЗИС-21 при $Q = 100$ м ³ /час сл/мин
12,4	35,1	0,188	0,426	0,452	2,21	2,87
15,8	33,1	0,178	0,418	0,440	2,27	2,79
20,0	30,6	0,164	0,389	0,481	2,32	2,73
29,8	27,6	0,148	0,343	0,441	2,26	2,80
37,4	28,7	0,153	0,303	0,510	1,96	3,22

Помимо „технологических“ факторов, ставящих предел нагрузки газогенератора, существуют еще „термические“ факторы, определяющие максимальную тепловую нагрузку камеры. Для газогенераторов, работающих на древесном топливе, технологическая предельная нагрузка достигается значительно раньше термической.

Чтобы при кратковременной работе с технологической перегрузкой объем древесного угля в камере не уменьшался слишком резко, Финкбайнер рекомендует следующие нормы запаса активного слоя.

Вес древесного угля в камере должен быть не меньше

$$G_{yz} \geq 4(Q'_2 - Q''_2)b,$$

где Q'_2 — отбор газа при перегрузке в $\text{м}^3/\text{час}$,

Q''_2 — отбор газа при предельной нагрузке,

b — содержание углерода в газе в $\text{кг}/\text{м}^3$,

4 — коэффициент запаса угля.

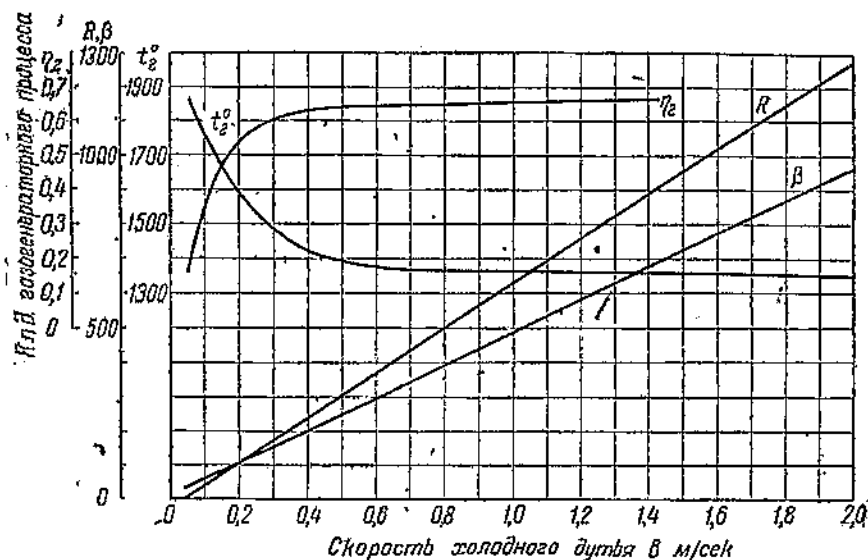
При эксплуатации газогенераторов, работающих на древесном угле или антраците, технологическая перегрузка, как уже было сказано, трудно достижима. Критическая скорость газа в активном слое, при котором реакция между C топлива и O_2 воздуха не успевает произойти ни в лабораторных, ни в производственных условиях, не была достигнута. Поэтому практически газогенератор, работающий на указанных сортах топлива, не имеет „ограничения по технологии“. Предельная нагрузка для этого типа установок определится максимально допустимым сопротивлением газогенератора и тепловым напряжением камеры. В табл. 54 даны результаты экспериментальных работ, проведенных в ВТИ. В зависимости от скорости газового потока в слое топлива подсчитан ряд параметров, характеризующих процесс газификации (табл. 54).

Таблица 54

Влияние скорости дутья на процесс газификации
Обработка данных ВТИ

v м/сек	CO %	CO_2 %	$(\text{CO} + \text{CO}_2)$ %	Содержание C в 1 м^3 газа $\text{кг}/\text{м}^3$	Выход газа из 1 кг С в $\text{м}^3/\text{кг}$	Количество тепла, выделяющееся при образовании 1 м^3 газа, кал	Количество тепла, выделяющееся при газификации 1 кг С , кал	H_2 $\text{кал}/\text{м}^3$	η	ρ $\text{кг}/\text{м}^3 \text{ сек}$	R $\text{кг}/\text{м}^3 \text{ час}$	Теоретическая температура горения $^\circ\text{C}$
0,05	5	16	1	0,1125	8,9	768,2	6840	151,5	0,166	37,9	20,8	1865
0,125	16	10	26	0,1394	7,17	643	4620	485	0,43	81	63	1745
0,25	25	5	30	0,1608	6,23	548	3880	760	0,585	135	144,5	1525
0,5	29	2,5	31,5	0,1685	5,93	486,5	2880	880	0,643	244	304	1395
0,75	30	2	32	0,1715	5,83	480	2800	910	0,654	362	465	1380
1,0	31	1,5	32,5	0,1740	5,75	468,7	2680	940	0,678	467	627	1365
1,5	31,5	1,5	33	0,1760	5,6	473,7	2670	955	0,665	723	960	1360
2,0	31,6	1,5	33	0,1760	5,65	473,7	2670	955	0,665	962	1275	1360

Из таблицы видно, что с повышением скорости газового потока, т. е. с увеличением интенсивности отбора газа, объемное тепловое напряжение камеры и напряжение зеркала горения растут, но температура горения уменьшается (фиг. 32). Расчет сделан для случая газификации древесного угля сухим воздухом. Теоретические температуры горения при изменении скорости дутья колеблются в границах двух предельных значений, соответствующих идеально-воздушному процессу газификации и полному сгоранию С в CO_2 при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1$.



Фиг. 32. Влияние скорости газового потока на процесс газификации: R — напряженность горения в $\text{кал/м}^2\text{час}$; β — тепловое напряжение камеры в $\text{кал/м}^2\text{сек}$; t_2 — теоретическая температура горения в $^{\circ}\text{C}$.

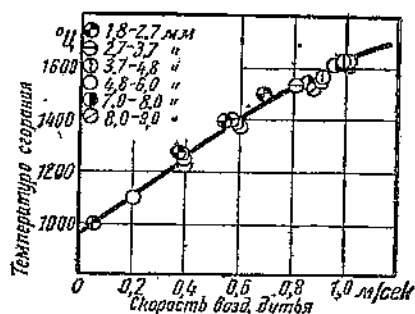
Таблица 55

Сравнение идеального воздушного процесса со случаем полного сгорания при $\alpha = 1$

Характер процесса	CO %	CO ₂ %	Содержание С в 1 м ³ газа	Выход газа из 1 кг С в м ³ /кг	Количество тепла, выделяющегося при образовании 1 м ³ /кг газа	Количество тепла, выделяющегося при газификации 1 кг С кал	H_H кг/м ³	η_2	Температура горения $^{\circ}\text{C}$
Идеально-воздушный процесс	34,7	—	0,186	5,38	452	2435	1053	0,7	1310
Полное сгорание	—	21	0,1127	8,87	913	8100	0	0	2220

Несмотря на уменьшение теоретической температуры горения, действительная температура слоя топлива с увеличением линейной скорости газового потока растет. Это происходит оттого, что скорость потока пропорциональна количеству кислорода, вступающего в реакцию с углеродом в единицу времени.

Зависимость температуры слоя от линейной скорости дутья дана на фиг. 33.



Фиг. 33. Зависимость температуры горения слоя от линейной скорости дутья.

Линейная скорость w_0 , рассчитанная на холодное дутье и свободное сечение камеры, является, конечно, фиктивной скоростью. Представляя большое удобство в качестве параметра, характеризующего процесс газификации, она не дает представления об истинном значении скорости газа в активном слое.

$$w_0 = \frac{L}{F} \text{ м/сек,}$$

где L — расход воздуха в $\text{м}^3/\text{сек}$ при нормальных физических условиях,

F — площадь сечения в м^2 .

Действительная скорость, как известно,

$$w_g = \frac{L \frac{t + 273}{273}}{F_g}.$$

Учитывая эти факторы, Хитрин и Колодцев дают следующие соотношения между фиктивными и действительными скоростями (в м/сек):

Таблица 56

w_0	0,05	1,05	2,04	2,5
w_g	1,2	37,3	76	89

При таких больших скоростях газового потока приходится считаться с сопротивлением слоя. Не явится ли сопротивление слоя фактором, определяющим предельную нагрузку газогенератора? Сопротивление слоя пропорционально высоте зоны и квадрату скорости потока¹. Но после перехода редуционного режима газификации в скоростной высота активного слоя резко уменьшается. Например при $w=1 \text{ м/сек}$ высота кислородной зоны в опытах Гродзовского и Чуханова равнялась 8 мм, в

¹ Согласно опытам, проведенным в НАТИ, сопротивление слоя топлива в работающем газогенераторе прямо пропорционально скорости газового потока в пределах от 0 до 1,4 м/сек , считая на холодное дутье. Ред.

результате чего сопротивление газогенератора не превышает допустимого предела.

Чтобы осуществить в транспортном газогенераторе высокоскоростной процесс, не следует прибегать к чрезмерным скоростям газа в слое топлива, так как при этом неизбежно большое сопротивление. Достаточно только создать скорость воздуха у фурм порядка 20—30 м/сек, что обычно и практикуется.

3. Влияние переменной нагрузки на работу газогенератора

При переводе двигателя с бензина на генераторный газ динамика автомобиля обычно ухудшается. Это происходит из-за падения мощности и ухудшения приемистости двигателя. Причины падения мощности двигателя будут разобраны дальше, здесь же постараемся выяснить факторы, нарушающие приемистость.

Приемистость двигателя характеризуется, как известно, временем, в течение которого он может достигнуть с минимального заданного числа оборотов при постоянном тормозном моменте максимально больших оборотов. В более широком смысле этого слова приемистость характеризует быстроту приспособляемости двигателя к переменной нагрузке. Нарушение динамических качеств транспортной установки есть результат отставания режима газогенератора от режима двигателя.

Газогенераторная установка в отличие от простого и относительно гибкого карбюратора, также выполняющего функции подготовки рабочей смеси, является чрезвычайной инерционной системой. Ряд исследований, проведенных у нас, в Союзе, и за границей, показывает, что переменная нагрузка газогенераторов нарушает правильный процесс газообразования.

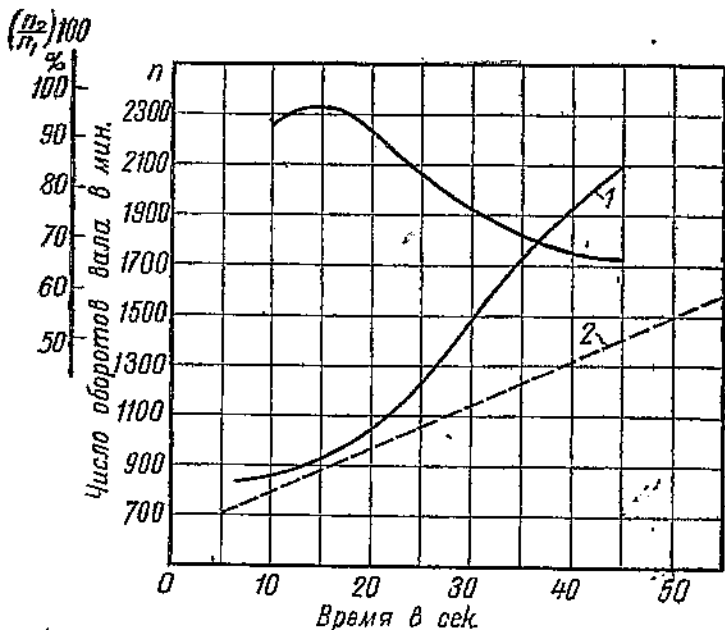
Для характеристики приемистости газогенераторных двигателей интересны опыты Ленинградского индустриального института с двигателем ГАЗ, работающим на древесноугольном газе. Двигатель испытывался с постоянным тормозным моментом 9,3 кгм.

На фиг. 34 дано сравнение кривых приращения оборотов при постепенном и резком открытии дросселя. Как видно из кривых, при постепенном открытии дроссельной заслонки число оборотов, а следовательно, и мощность возрастают значительно скорее, чем при резком изменении интенсивности отбора газа.

Там же дана кривая изменения отношения $\frac{n_2}{n_1}$ по времени. Однако если бы продолжить опыт еще несколько минут, расхождение кривых постепенно уменьшилось бы и обе кривые пересеклись.

Испытание древесного газогенератора Дейц, рассчитанного на 60 л. с., с двигателем Комник 37 газовых сил, также дает характеристику влияния переменной нагрузки на работу газогенератора. Для выяснения влияния быстрой нагрузки на поведение двигателя был проделан следующий опыт. Двигатель,

работающий на холостом ходу при 1100 об/мин, был внезапно нагружен, причем дроссель был установлен в положение, соответствующее мощности в 22 л. с. Как видно из фиг. 35, двигатель достиг заданной мощности лишь спустя 4 мин. Если же нагружать двигатель постепенно, так чтобы число оборотов



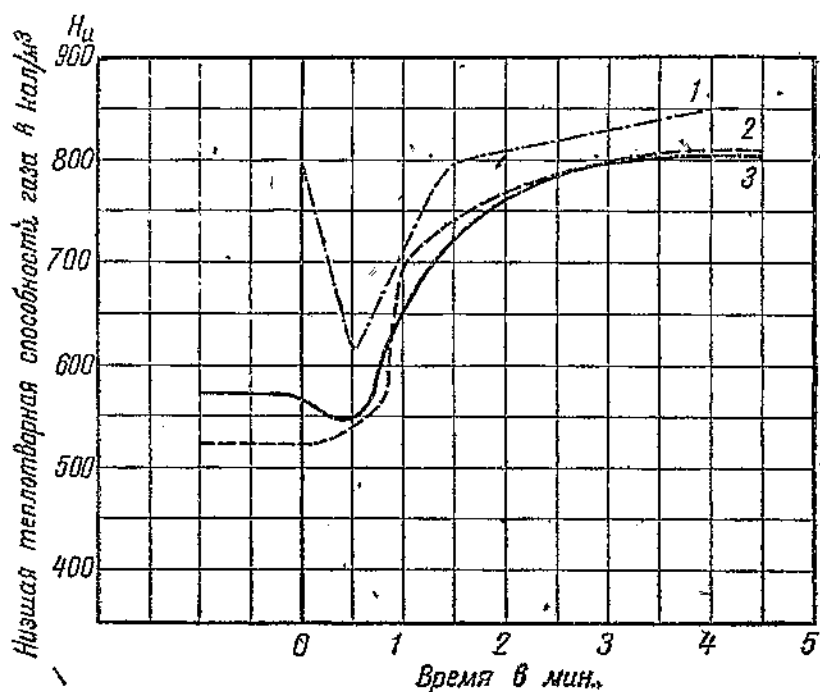
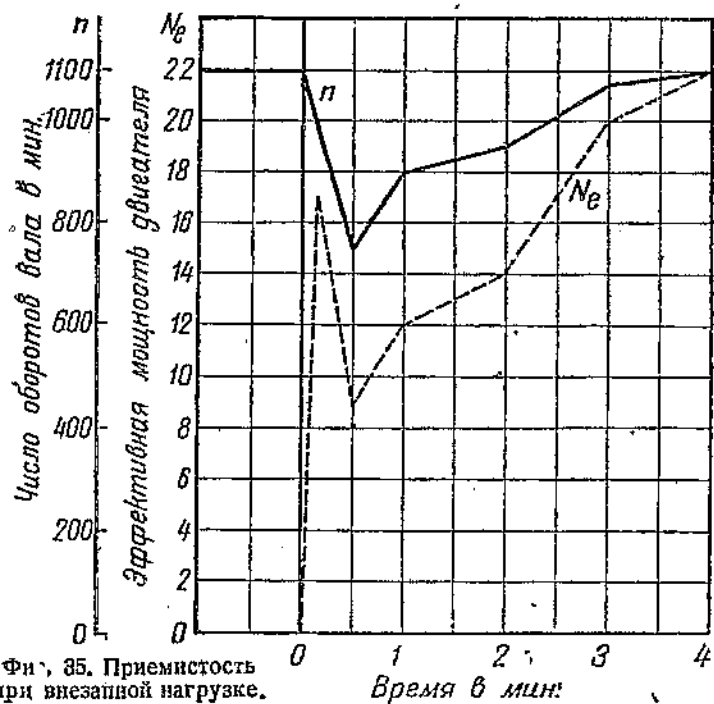
Фиг. 34. Сравнение кривых приемистости при резком и постепенном открытии дросселя по опытам ЛИИ (тормозной момент 9,3 кгм):
1 — постепенное открытие дросселя; 2 — резкое открытие дросселя.

оставалось постоянным, то это время значительно сокращается. Например, при постепенной поднагрузке этот же двигатель в продолжение 40 сек. от холостого хода достигал мощности $N_e = 24$ л. с., а в продолжение примерно 1,5—2 мин. от холостого хода — до 35 л. с.

Итак, время, в течение которого нагружается двигатель, является важным фактором, определяющим динамику установки.

Скорость разгона двигателя после кратковременной работы на малых оборотах холостого хода зависит еще в значительной степени от конструкции смесителя, который должен быть снабжен специальным приспособлением, изменяющим во время разгона расход воздуха, поступающего в смеситель.

При внезапном открытии дросселя содержание азота возрастает, содержание же других компонентов несколько уменьшается. Это, несомненно, указывает на некоторое отставание процесса газификации. Но вот проходит первый период нагрузки, и состав генераторного газа опять изменяется. Содержание CO и H_2 начинает расти, содержание CO_2 и N_2 уменьшается, концентрация CH_4 и кислорода за все время опыта остается почти неизменной. В результате этих изменений теплотворная способность газа растет (фиг. 36).

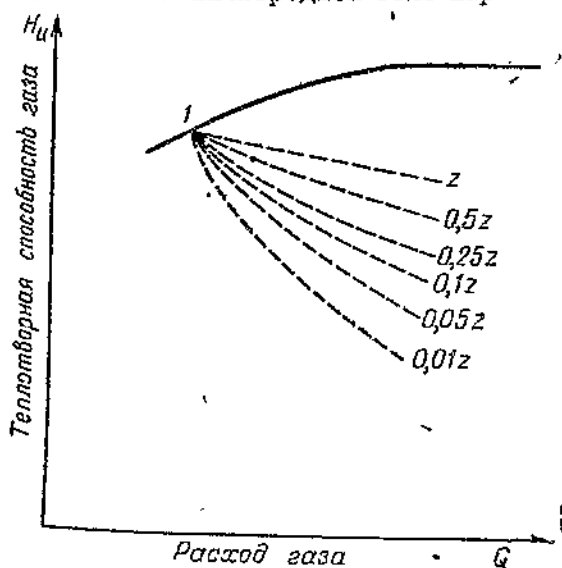


1 — от холостого хода до полной нагрузки $n = 1100$ об/мин; 2 — от холостого хода до $\frac{2}{3}$ полной нагрузки $n = 1100$ об/мин; 3 — от холостого хода до $\frac{1}{2}$ полной нагрузки $n = 1000$ об/мин

При разгрузке газогенератора наблюдалось обратное явление. Содержание азота при разгрузке падает и теплотворная способность газа на некоторое время возрастает. Таким образом, состав газа, соответствующий холостому ходу, достигается не сразу, а лишь по прошествии 2—3 мин., что является положительным фактом в условиях эксплуатации газогенераторов.

К сожалению, автор исследования Фелькер не обратил никакого внимания на свое же собственное замечание о том, что газогенератор работал с большой недогрузкой (газогенератор, рассчитанный на 60 л. с., работал с двигателем с максимальной мощностью 37 л. с.). Полученные опытные данные считаются Фелькером типичными для всех газогенераторов, хотя никаких особых обобщений в работе не сделано.

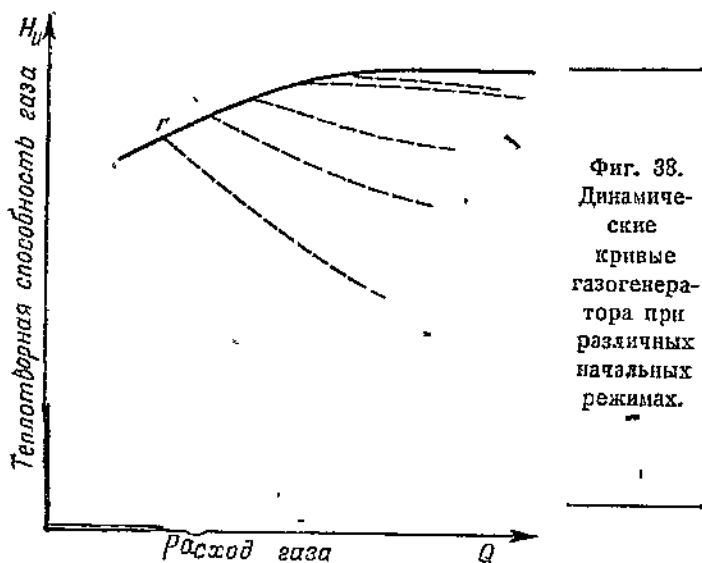
Рассмотрим явления, вызванные изменением нагрузки газогенератора, работающего на установившемся редуцированном режиме. С увеличением отбора газа время контакта газовых масс с восстановительным слоем соответственно уменьшается. Температура активного восстановительного слоя остается некоторое время постоянной, хотя параметры кислородной зоны реагируют на изменение режима чрезвычайно быстро. Уменьшение времени контакта вызовет повышение количества невосстановившейся CO_2 и теплотворная способность газа уменьшится. Процент разложившихся в кислородной зоне паров воды достаточно велик во



Фиг. 37. Общий характер динамических кривых газогенератора для разных периодов разгона.

всем диапазоне скоростей газового потока. Содержание водорода поэтому изменяется значительно меньше, чем содержание окислов С. Итак, при переходе газогенератора на новый режим несоответствие между температурой слоя и временем контакта будет тем сильнее, чем больше возрос объем газа Q м³/сек и чем меньше времени было затрачено на изменение режима z сек. (разгон). На фиг. 37 дан общий характер динамических кривых

газогенераторов. Сплошная кривая представляет зависимость $H_u = f(Q)$ при установившемся режиме. Расходящийся пучок пунктирных кривых показывает изменение теплотворной способности генераторного газа в зависимости от увеличения интенсивности отбора. Чем больше период разгона z , тем выше расположатся кривые $H_u = f(Q)$.



Фиг. 38.
Динамические
кривые
газогенера-
тора при
различных
начальных
режимах.

На фиг. 38 даны динамические кривые в зависимости от начального расхода газа Q п.и. одном и том же времени разгона. Чем ближе процесс, предшествующий разгону, к критическому значению Q , при котором редукционный режим переходит в скоростной, тем меньше наклон кривой $H_u = f(Q)$ и, следовательно, меньше предварительное падение мощности (см. опыты Фелькера).

При работе на скоростном режиме роль реакции восстановления сводится к минимуму, и высота активной зоны уменьшается. Температурный режим узкой кислородной зоны меняется чрезвычайно быстро и в каждый данный момент соответствует интенсивности отбора газа. Состав газа на скоростях отбора выше критических с повышением отбора практически остается неизменным. Следовательно, газогенератор, работающий на скоростном режиме, приемистее, чем на редукционном.

Максимум индикаторной мощности двигателя может быть найден из следующих соображений (аналогичный расчет имеется в предыдущем параграфе). Индикаторная мощность:

$$N_i = k \eta_v n h_u,$$

где k — коэффициент пропорциональности,

η_v — коэффициент подачи,

n — число оборотов,

h_u — теплотворная способность рабочей смеси газа с воздухом.

Дифференцируя это уравнение по числу оборотов и приравнявая первую производную нулю, найдем условие для максимума или минимума кривой $N_i = f(n)$:

$$\frac{dN_i}{dn} = k \left(\frac{d\eta_v}{dn} n \cdot h_u + \frac{dh_u}{dn} n \eta_v + \eta_v h_u \right) = 0.$$

Отсюда

$$\Delta h_u = \left(\frac{\Delta \eta_v}{\eta_v} + \frac{\Delta n}{n} \right) h_u. \quad (182)$$

Допустим, что в начальный момент разгона $n = 1100$ об/мин, $\eta_v = 0,8$ и $h_u = 520$ кал/м³. Известно, что при изменении оборотов на $\Delta n = 100$, η_v уменьшается так, что $\Delta \eta_v = -0,03$. Тогда

$$-\Delta \eta_v = \left(-\frac{0,03}{0,8} + \frac{100}{1100} \right) 520 = 27,8 \text{ кал/100 об.}$$

Это значит, что при выбранном значении параметров максимум мощности будет соответствовать диапазону оборотов, при котором падение теплотворной способности рабочей смеси составит 27,8 кал на каждые 100 об/мин.

При постоянном числе оборотов

$$-\Delta h_u = \frac{\Delta \eta_v}{\eta_v} h_u.$$

Предположим, что в момент неполной нагрузки $h_u = 400$ кал/м³ и $\eta_v = 0,60$. При быстром увеличении нагрузки для сохранения $n = \text{const}$ дроссель смеси должен открываться резким движением. Допустим, что при этом через 3 сек. коэффициент подачи возрастет до 0,87. Тогда $\Delta \eta_v$, отнесенная к одной секунде, равна $\Delta \eta_v = 0,09$, и

$$-\Delta h_u = \frac{0,09}{0,60} 400 = 60 \text{ кал/сек.}$$

При плавном открытии дросселя, например в течение 27 сек.

$$\Delta \eta_v = \frac{0,87 - 0,60}{27} = 0,01;$$

$$-\Delta h_u = \frac{0,01}{0,60} 400 = 6,7 \text{ кал/сек,}$$

т. е. при резком открытии дросселя для достижения максимума индикаторной мощности необходимо падение теплотворной способности газа в 60 кал/сек при постепенном открытии дросселя только 6,7 кал/сек².

¹ Здесь при $n = \text{const}$ речь идет об обстоятельствах, при которых наступает максимум индикаторной мощности по наполнению, т. е. об условиях, обеспечивающих

$$\frac{dN_i}{dn} = 0.$$

Эти условия таковы: при быстром открытии дросселя смеси ($\Delta \eta_v$ — велико) требуется быстрое изменение теплотворной способности смеси (Δh_u — велико), чтобы максимум N_i согласно примеру был достигнут через 3 сек. Для достижения максимума N_i через 27 сек. достаточно более медленное изменение теплотворной способности (Δh_u — мало). Другими словами, существует связь:

$$\frac{\Delta \eta_v}{\eta_v} = -\frac{\Delta h_u}{h_u}.$$

Следовательно, при резком открытии дросселя мощность двигателя должна расти, если уменьшение теплотворной способности не превышает 60 кал/сек. Чем быстрее идет нагрузка двигателя, т. е. чем меньше время разгона, тем больше значение $-\Delta h_u$, характеризующего конец приращения мощности. Но с увеличением предельной нагрузки и уменьшением времени разгона растет также падение теплотворной способности газа (см. динамические кривые). Отношение $-\Delta h_u^p$ расчетного к Δh_u^o , соответствующему динамическим кривым газогенератора, характеризует приемистость газогенераторного двигателя.

При

$$\frac{\Delta h_u^p}{\Delta h_u^o} = 1 \quad (183)$$

достигается максимум эффективной мощности.

При

$$\frac{\Delta h_u^p}{\Delta h_u^o} < 1 \quad (184)$$

мощность падает, несмотря на увеличение числа оборотов или открытие дроссельной заслонки.

При

$$\frac{\Delta h_u^p}{\Delta h_u^o} > 1 \quad (185)$$

мощность двигателя растет.

Эти формулировки приближены, потому что между h_u и H_u нет прямой пропорциональности. Нет ее также и между N_i и N_e , когда нагрузка меняется, так как $N_i = N_e + N_R$, причем при $n = \text{const}$ в большинстве случаев мощность трения N_R тоже постоянна.

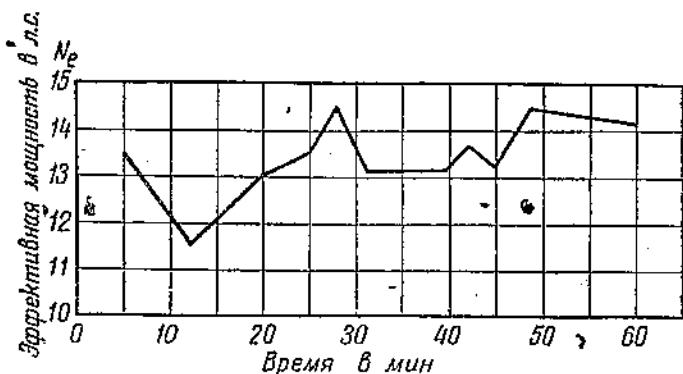
При анализе процесса разгрузки двигателя методика остается той же. Чем больше отношение $\frac{\Delta h_u^p}{\Delta h_u^o} = a$, тем круче пойдет кривая нагрузки (по времени или по числу оборотов) и, следовательно, тем быстрее будет достигнута заданная мощность. Подставив в это отношение значение Δh_u^p , получим, что приемистость газогенераторного двигателя зависит от величины

$$a = \left(\frac{\Delta \eta_{\eta}}{\eta_{\eta}} + \frac{\Delta n}{n} \right) \frac{h_u}{\Delta h_u}. \quad (186)$$

Таким образом, на приемистость двигателя влияет не только режим газогенератора, но и вся установка с ее очистителями, газопроводами и т. д. Это влияние выражено в параметре $\Delta \eta_{\eta}$, так как динамика изменения коэффициента наполнения зависит от сопротивления установки.

4. Влияние неравномерности процесса газификации на работу двигателя

Мы рассмотрели работу газогенератора при переменной нагрузке. Изменения интенсивности отбора, как показывают экспериментальные и теоретические исследования, нарушают процесс газификации. Однако и при постоянном отборе газа теплотворная способность смеси может меняться в широких пределах, вызывая колебания мощности.



Фиг. 39. Колебание мощности двигателя Фордзон, работающего на генераторном газе.

На фиг. 39 показано колебание мощности двигателя Фордзон при испытании на постоянном числе оборотов. Неравномерность работы двигателя вызвана в данном случае переменным составом газа. Изменение состава генераторного газа при постоянном отборе происходит под влиянием многих причин.

Важным фактором, определяющим состав газа, является влажность топлива. При газификации древесины ее влажность все время меняется. Чем ниже опускается слой топлива в бункере, тем меньше гигроскопической влаги участвует в газогенераторном процессе.

Как показывает расчет, вся гигроскопическая влага является балластом для процесса, так как химической воды, получающейся при газификации древесного топлива, избытком хватает на ведение реакции водяного газа.

Приведенный ранее тепловой баланс газогенератора дает лишь среднее значение параметров за все время выдачи 100 молей сухого нормального газа. Действительный же тепловой баланс от начала розжига газогенератора до полного выгорания топлива непрерывно меняется.

Меняется влажность топлива и состав генераторного газа. Меняется соотношение всех статей теплового баланса и величина к. п. д. газогенератора.

Всякие нарушения нормальной работы газогенератора, например зависание топлива над фурмами, еще больше усиливают неравномерность процесса газификации. По мере выгорания топлива в активной зоне происходит его осадка. Новые порции топлива толчками опускаются из бункера в камеру газификации. В моменты опускания слоя ряд параметров, определяющих условия работы газогенератора, меняется, что сейчас же сказывается на составе газа.

Таким образом, неравномерность процесса является органической особенностью работы нормального газогенератора. Отдельные факторы (род топлива, высота и диаметр активной зоны, расход газа и т. д.) могут лишь повлиять на степень неравномерности, но устранить ее полностью не могут. В частности, с увеличением объема активной зоны колебания в составе газа значительно уменьшаются. Пропорционально колебаниям теплоотворной способности смеси (которые могут не совпадать по знаку с колебаниями теплотворной способности газа) будет меняться и мощность двигателя.

На величину мощности двигателя при постоянном отборе газа может оказать влияние также изменение состояния слоя топлива. Сопротивление слоя зависит от степени засоренности промежутков между кусками топлива. Если свободное сечение слоя окажется забитым пылью, золой или шлаком, коэффициент наполнения двигателя неминуемо уменьшится, что вызовет падение мощности.

Уплотнение же слоя мелким углем исключительно хорошо способствует химизму газогенераторного процесса. Это установлено опытами НАТИ на древесном угле различной крупности с газогенератором типа Гоэн-Пулен, а также при работе на торфобрикетах, где активная зона сплошь состоит из торфяной мелочи. Мощность двигателя в связи с этим заметно возрастает до момента, пока сопротивление достигает высоких значений.

ВИ. АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИЙ СЕРИЙНЫХ СОВЕТСКИХ ГАЗОГЕНЕРАТОРОВ

Среди большого количества современных газогенераторов можно выделить несколько основных машин, послуживших моделями для целого ряда однотипных конструкций. Например, газогенератор Имберт сделанся родоначальником огромного семейства древесных газогенераторов с камерой Берлие и периферийным дутьем. У нас, в Союзе, по этому образцу построены почти все серийные транспортные древесные установки — ЗИС-21, ГАЗ-42, ХТЗ-Т2Г и др.

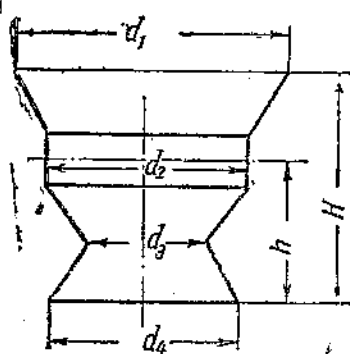
Другая большая группа газогенераторов работает по схеме горизонтального процесса, предложенной французским конструктором Гоэном. Изобретателем этого наиболее совершенного типа газогенератора является Имберт, запатентовавший схему горизонтального процесса еще в 1924 г. Однако современное конструктивное оформление, заимствованное и советскими серий-

ными машинами ЗИС-31 и ГАЗ-43, создано Гозном. Мы не разбираем третью группу газогенераторов с центральным подводом воздуха. Эта конструкция, развившаяся в основном на базе газогенератора Дейц, не получила у нас распространения.

Итак, длинное и однообразное описание нескольких десятков моделей газогенераторов можно заменить подробным анализом двух-трех конструкций, так как полученные выводы легко распространить на всю группу машин.

1. Газогенераторы ЗИС-21 и Г-14 (ГАЗ-42)

При разборе вопроса о соответствии газогенератора двигателю мы приводили для сравнения ряд параметров, характеризующих рабочий режим ЗИС-21 и Г-14 (табл. 49). Газогенератор ЗИС-21, так же как и Г-14, имеет камеру газификации типа Берлие с периферийным дутьем (фиг. 40).



Фиг. 40. Разрез камеры газификации ЗИС-21.

Размеры	ЗИС-21	ГАЗ-42 (Г-14)
d_1	495	400
d_2	340	200
d_3	160	120
d_4	330	300
H	205	174
h	110	70

Несколько причудливая конфигурация камеры была выбрана в результате длительных опытов. Благодаря плавному коническому переходу от бункера к плоскости фурм топливо не задерживается при входе в активную зону. Площадь сечения камеры и плоскости фурм значительно меньше площади сечения бункера. Это уменьшение площади создает высокое напряжение горения в плоскости подвода воздуха; кроме того, позволяет удобно разместить кольцевой воздушный пояс, из которого воздух через фурмы поступает в камеру газификации.

Остальной объем камеры образован двумя усеченными конусами. Место соединения этих конусов создает горловину, в которой напряжение горения колеблется в пределах 2000—2500 кг/м² час. Необходимо, однако, помнить об условности этих цифр, так как действительный расход топлива в горловине ничтожно мал. Такое высокое значение параметра R обеспечи-

вает хорошую очистку газа от смол и других продуктов сухой перегонки. Высокие температуры и скорости газа в этой части камеры повышают интенсивность крекинга смол.

Широкий раструб, идущий после горловины, уменьшает скорость газа в слое топлива, лежащем в нижней части активной зоны. Благодаря этому уменьшается унос пыли из камеры газификации. Узкая горловина, отделяющая зону восстановления от бункера, предохраняет нижний слой топлива от раздавливания.

2. Тепловая нагрузка и сопротивление

Общий объем камеры ЗИС-21—27,19 л, объем ее активной части (от плоскости фурм)—12,5 л. Двигатель ЗИС-21 при достижении максимальной мощности 48 л. с. расходует 43 кг древесных чурок в час. По этим данным и определены основные параметры газогенератора (табл. 49).

Сравнение тепловых напряжений камер ЗИС-21 и Г-14 приводит к заключению, что газогенератор ЗИС-21 работает с большой недогрузкой.

В самом деле, параметр β для ЗИС-21

$$\beta = \frac{G_{\text{двс}} h_n (1 - \eta_2)}{V_k 3600} = \frac{43 \cdot 3770 (1 - 0,75)}{0,0125 \cdot 3600} = 900 \text{ кал/л}^3 \text{ сек},$$

в то время как у Г-14 $\beta = 1500 \text{ кал/л}^3 \text{ сек}$.

Газогенератор Г-14 показал хорошие эксплуатационные качества, поэтому в выборе оптимальных напряжений можно ориентироваться на его параметры. Согласно данным НАТИ и ЗИС путем переделок газосасывающей системы двигателя ЗИС-21 можно увеличить его мощность до 68 л. с. При работе с таким модернизированным двигателем удельный объем активной зоны камеры газификации ЗИС-21 был бы равен:

$$V_{\text{уд}} = \frac{12,5}{68} = 0,184 \text{ л/э. л. с.},$$

что вполне допустимо (у Г-14 $V_{\text{уд}} = 0,157$).

Однако не следует забывать, что повышение нагрузки на 30—40% может потребовать технологических изменений в методах изготовления камеры газификации, рассчитанной на меньшее тепловое напряжение. Повышение мощности двигателя до 68 л. с., несомненно, улучшило бы использование габаритов камеры, но не вполне, так как для достижения нормальных для данного типа газогенератора тепловых напряжений мощность двигателя должна быть равна 80 л. с. Повышение мощности двигателя на 67% (с 48 до 80 л. с.) вызовет соответствующее увеличение скорости воздуха в фурмах и газа в слое топлива. Чтобы сохранить сопротивление газогенератора постоянным, придется поэтому несколько увеличить диаметры воздушных фурм и горловины камеры.

Сопротивление газогенератора складывается в основном из сопротивления фурм и слоя топлива:

$$h_z = h_{\phi} + h_c, \quad (187)$$

где h_{ϕ} — сопротивление фурм,

h_c — сопротивление слоя.

Основным слагаемым этой суммы является сопротивление в фурмах. Причина этого очевидна. Общая площадь сечения фурм в газогенераторе ЗИС-21 равна 6,64 см², в то время как свободное сечение в самой узкой части камеры — горловине — 100 см². Скорость воздуха в фурмах достигает 35 м/сек. В горловине скорость газа доходит до 14,5 м/сек. Но вследствие значительно более высокой температуры (в фурмах температура воздуха — 40—50°, в горловине — около 1200°) вязкость газа, а следовательно, и потери на трение будут здесь намного ниже.

Сопротивление газогенератора при постоянном отборе газа не остается без изменения. В начале пуска газогенератора его сопротивление всегда несколько больше. По мере повышения температуры процесса сопротивление постепенно снижается, достигая минимального значения, абсолютная величина которого зависит от размера и породы дерева.

В табл. 57 даны результаты соответствующих испытаний газогенератора Имберт, проведенных Кохом и Кюне.

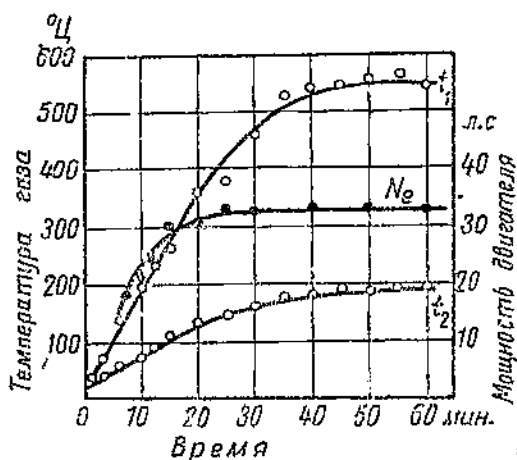
Таблица 57

Изменение сопротивления газогенератора по времени от начала розжига

Время от начала розжига в минутах	Сопротивление газогенератора в мм вод. ст.		
	Влажность топлива $W = 17\%$ Размер 8 см × 20 см ²	$W = 17\%$ Размер 8 см — (30—50) см ²	$W = 31\%$ Размер 8 см (30—50) см ²
5	248	245	281
10	251	245	253
15	213	245	237
20	206	238	220
25	175	215	195
30	175	188	188

Уменьшение сопротивления газогенератора можно объяснить также уменьшением вязкости газа с повышением температуры

активной зоны (фиг. 41). Падение сопротивления газогенератора после его розжига объясняется значительным снижением расхода воздуха, поступающего в генератор (примерно в полтора раза), происходящим по трем причинам: 1) из-за уменьшения расхода газа, так как его качество улучшается и L_0 для двигателя возрастает; 2) из-за уменьшения коэффициента молекулярного изменения при газификации, так как содержание CO_2 в газе падает за счет роста CO ; 3) из-за повышения температуры в бункере, вызывающего образование пара и газов сухой перегонки топлива. Когда топливо в бункере приходит к концу, сопротивление газогенератора вновь возрастает.



Фиг. 41. Пусковая характеристика газогенератора Имберт.

3. Скоростной характер процесса

При подсчете скоростей газа в различных сечениях камер ЗИС-21 и Г-14 мы убедились, что на некоторых режимах эти скорости обеспечивают скоростной характер процесса газификации. Например скорость газа в горловине камеры ЗИС-21 (считая на свободное сечение и холодный газ)

$$w = \frac{Q}{f \cdot 3600} \text{ м/сек.}$$

Подставив цифровые значения, получим:

$$w = \frac{103}{0,02 \cdot 3600} = 1,43 \text{ м/сек,}$$

что почти в 3 раза больше критической скорости перехода редуccionного режима в скоростной.

Итак, газогенераторы ЗИС-21 и Г-14, сконструированные по типу старой французской машины, оказывается, работают не на редуccionном, а на скоростном режиме.

Однако необходимо помнить, что газогенератор не всегда работает на максимальной мощности. При меньшем отборе газа скорость движения продуктов газификации в зоне горения не может обеспечить своевременный вынос CO . Полученная CO успеет поэтому окислиться до CO_2 , и тогда «восстановительный» слой топлива, лежащий за горловиной и отчасти расположенный между камерой и стенками внешнего кожуха, «приступит» к выполнению своих прямых функций. Скоростной характер

процесса газификации в газогенераторах ЗИС-21 и Г-14 подтверждает и поверочный расчет зоны восстановления.

Предположим, что газогенератор ЗИС-21 (работающий с тепловой недогрузкой) является редукионным, и подсчитаем, какой процент СО может обеспечить его восстановительный объем. Восстановительным объемом камеры могут считаться (фиг. 40) два усеченных конуса, образующих горловину. Их суммарный объем равен $\sim 7,5$ л. Обычно вокруг раструба камеры газификации насыпается дополнительное количество угля. Этот уголь добавляет к восстановительному поясу, еще около 20 л полезного объема. Тогда окончательно объем зоны восстановления $V_s = 27,5$ л.

Время контакта газа с топливом восстановительной зоны может быть определено по формуле (149):

$$\tau = \frac{V_{\text{зп}} \cdot 2 \cdot 3600}{G_{\text{зас}} (L + F) \left(\frac{t + 273}{273} \right)} \text{ сек.}$$

Подставив цифровые значения величин, входящих в формулу, получим:

$$V_s = \frac{0,0275 \cdot 0,5 \cdot 7200}{43 (1,4 + 2,4) \frac{1373}{273}} = 0,12 \text{ сек.}$$

Остается выяснить, какое количество CO_2 успеет восстановиться за это время. Скорость восстановления может быть определена по формуле (152):

$$k_1 z = \frac{2,303}{\frac{1+a}{2}} \lg \left(\frac{1}{a - \frac{1+a}{2} x} \right) + C.$$

Для определения константы интегрирования C необходимо задаться начальными условиями. В начале реакции $z=0$, $x=0$, первоначальное содержание CO_2 можно принять равным 0,19 (т. е. 19%). Тогда $C = -2,78$. Константа скорости реакции для нашего случая может быть принята $k=1,53$ (табл. 43). Подставив в формулу значение указанных величин, получим:

$$1,53 \cdot 0,12 = \frac{2,303}{\frac{1+0,19}{2}} \lg \left(\frac{1}{0,19 - \frac{1+0,19}{2} x} \right) - 2,78;$$

$$0,183 = 3,87 \lg \left(\frac{1}{0,19 - 0,695x} \right) - 2,78.$$

Решая это уравнение относительно x , получим:

$$x = 0,0334,$$

т. е. даже с учетом дополнительного восстановительного объема, расположенного вне камеры газификации, и если бы при максимальном отборе газа газогенератор работал на редукион-

ном режиме, то содержание СО в продуктах газификации было равно 3,34%. Таким образом, этот расчет служит еще одним бесспорным доказательством того, что ЗИС-21 почти на всех режимах работает как скоростной газогенератор.

Найдем время, которое необходимо для образования хотя бы 18% СО в газогенераторе, работающем на редукионном режиме. Подставляя новые данные в уравнение (152), получим:

$$1,53 \cdot z = 3,87 \lg \left(\frac{1}{0,19 - 0,595 \cdot 0,18} \right) - 2,78,$$

откуда $z = 3,44$ сек.

Легко вычислить, что это время контакта может быть обеспечено в газогенераторе ЗИС-21 только при часовом расходе топлива в 1,5 кг.

Эти расчеты подтверждаются экспериментальными данными. Исследования состава газа, взятого в плоскости фурм у газогенератора Г-14, проведенные Мезиным, показывают, что процесс газификации заканчивается в основном в непосредственной близости от зеркала горения (табл. 58).

Таблица 58

Процесс газификации в плоскости фурм газогенератора Г-14
(по опытам Мезина)

Расстояние от фурмы в мм	50 мм	100 (центр камеры)	100 (центр камеры)	150	Средний состав газа в фур- менном поясе
O ₂	0,1	0,9	0,4	0,4	0,6
CO ₂	13,3	14,4	11,3	12,7	12,9
CO	7,9	5,9	17,1	12,2	10,8
H ₂	3,2	1,8	8,1	4,4	4,4
CH ₄	1,8	1,5	2,0	2,2	1,9
C _n H _m	2,2	1,8	1,3	0,5	1,4
N ₂	71,5	73,7	59,8	67,1	68,0

Недостаток СО и H₂ компенсируется уже на расстоянии 35—40 мм от плоскости фурм. Повышение содержания этих газов происходит отчасти за счет реакции водяного газа:



Увеличение высоты слоя топлива, таким образом, не дает заметного улучшения качества газа, если рабочий режим газогенератора достаточно близок к скоростному. Однако опыты

показывают повышение равномерности процесса газификации с увеличением высоты зоны. Колебания мощности двигателя, связанные с неравномерным опусканием топлива, значительно возрастают при работе на укороченной высоте реакционного слоя.

4. Влияние габаритов камеры на процесс газификации

Итак, расчеты и эксперимент приводят к выводу, что газогенераторы ЗИС-21 и Г-14 являются по существу скоростными. Кривые, полученные Гродзовским и Чухановым, показывают быстрый рост содержания СО с увеличением скорости газа. При критическом значении скорости газового потока вся СО, полученная на поверхности топлива, выносится из кислородной зоны. Абсолютное значение этой скорости зависит от рода топлива и размера его кусков.

Как влияют габариты камеры на процесс газификации? Можно ли сократить их до минимальных размеров, следуя основным выводам теории высокоскоростной газификации? До какого предела можно уменьшить диаметр камеры? Эти вопросы имеют большое практическое значение.

Широко поставленные в НАТИ эксперименты привели на первый взгляд к неожиданным результатам. Инж. Мезин, проводивший эти опыты, исследовал влияние диаметра камеры на процесс газификации. Опыты велись с тремя цилиндрическими камерами диаметром 120, 200 и 230 мм при расходе газа $40 \text{ м}^3/\text{час}$. При этом высота реакционного слоя была 305 и 125 мм. Результаты этих опытов даны на фиг. 42.

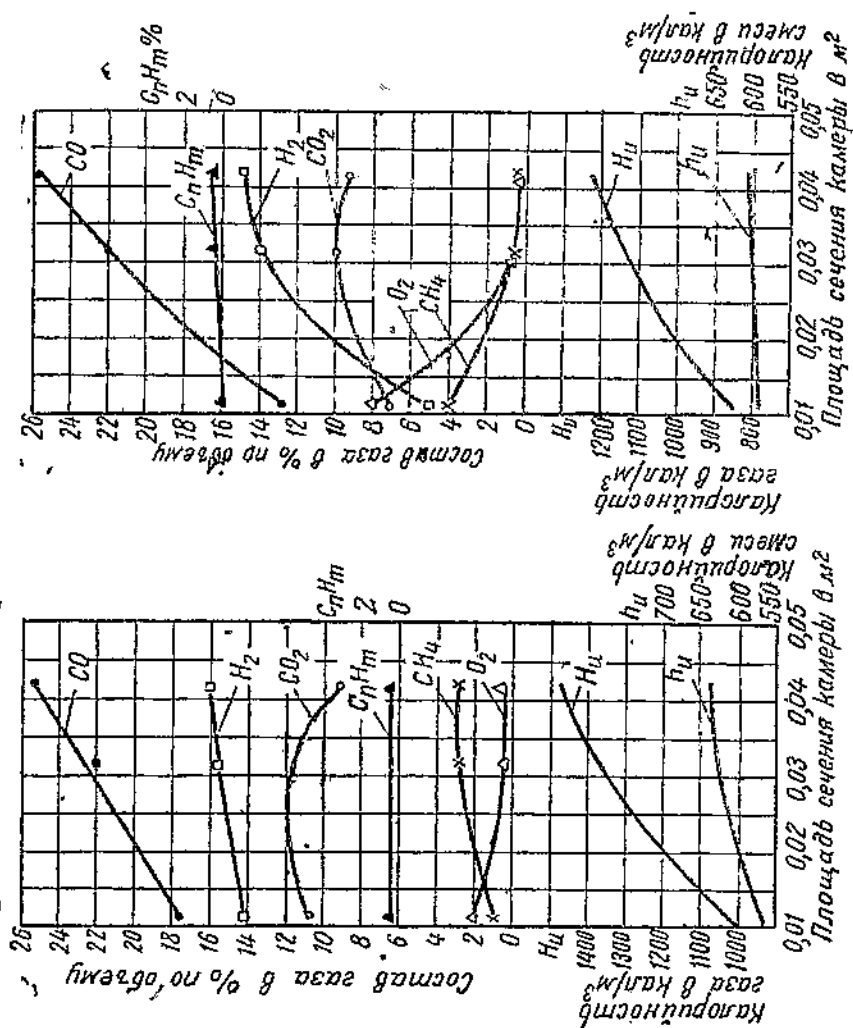
С увеличением диаметра камеры теплотворная способность газа растет. Следовательно, уменьшение напряжения зеркала горения, вызванное увеличением площади, улучшает процесс газификации. Обращает на себя внимание большое содержание кислорода в газе при камере малого диаметра (фиг. 42). Вместо обычных 0,5—0,6% его содержание доходит до 8%. Экспериментатор делает на основании этих графиков смелый вывод о невозможности сокращать диаметр у камер транспортных газогенераторов. Спрашивается, почему же у Чуханова, экспериментировавшего с кварцевыми трубками в 20 и 34 мм, получались другие результаты? Здесь необходимо отметить разницу в способах подачи воздуха непосредственно под решетку или слой, как это было у Чуханова, и через фурмы в опытах Мезина¹.

¹ Опыты с камерой диаметром 120 мм при обычных размерах чурок ($40 \times 50 \times 50 \text{ мм}$) сопровождались значительным зависанием топлива над фурменным поясом, что нарушало процесс газификации у фурм. Временами двигатель мог работать только вхолостую. На более мелких чурках ($20 \times 20 \times 20 \text{ мм}$) устойчивость работы улучшилась, но осталась ниже нормальной.

Ясно, что при сокращении диаметра камеры в транспортных газогенераторах потребуется уменьшать размер чурок, а это удорожит эксплуатацию.

Следует заметить, что в опытах Гродзовского и Чуханова применялся размельченный активизированный древесный уголь размером от 1,5 до 3,0 мм. Поэтому результаты этих и опытов НАТИ не могут сравниваться; способ же подвода воздуха тут принципиального значения не имеет.

Воздух подается через фурму со скоростью около 25—30 м/сек. Затухание скорости струи воздуха происходит не сразу. Поэтому в цилиндрической камере газификации образуется кольцевое пространство, в котором скорости воздушного потока превышают критическое значение, характеризующее переход на скоростной режим. Если в этой кольцевой



Фиг. 42. Влияние диаметра камеры на процесс газификации.

зоне большая часть кислорода воздуха успела прореагировать с топливом, то даже при скорости газового потока в слое топлива $w \ll w_{кр}$ первичные продукты газификации успеют выйти из камеры.

Состав газа зависит от взаимного действия целого ряда параметров—скорости потока, реакционного объема топлива, средней температуры слоя, времени контакта и т. д. Увязка

этих разнообразных факторов в один безразмерный параметр, определяющий характер процесса, представляет огромные трудности. Два газогенератора, для которых этот параметр (типа числа Рейнольдса) имел бы одно значение, были бы подобны. В главе о соответствии газогенератора двигателю мы уже убедились в том, что подобие процесса не имеет ничего общего с геометрическим подобием газогенераторов, и постройка моделей по этому принципу совершенно неправильна.

Однако при выборе диаметра камеры геометрические соотношения могут иметь место --- это соотношение между площадью сечения и размерами кусков топлива. Чем меньше куски топлива, тем больше их удельная поверхность, тем больше кислорода успеет прореагировать с топливом в данном объеме, тем меньше значение критической скорости газового потока и тем меньше может быть диаметр камеры. Несомненно, что на качество газа влияет равномерность опускания топлива и образование сводов, более вероятное при меньшем d_k . При большем d_k в центре камеры остается пространство, свободное от кислорода (так называемая непрогорающая зона), через которое проходит часть продуктов сухой перегонки, обогащая собой газ. Последнее имеет место лишь при газификации битуминозных топлив. При работе газогенератора на антраците или древесном угле роль продуктов сухой перегонки сводится к минимуму и, следовательно, влияние диаметра камеры на теплотворную способность газа с этой стороны прекращается.

5. Смолосодержание

Помимо породы и влажности топлива на величину смолосодержания в газе большое влияние оказывает конструкция камеры газификации. Высокая температура в горловине камеры является одним из основных барьеров на пути паров смолы. Температура в горловине зависит от интенсивности отбора газа, диаметра горловины и ее расстояния до плоскости фурм. Испытания газогенератора Г-19 с камерой типа Берлие на смолосодержание газа при различных диаметрах горловины, проведенные НАТИ, дали следующие результаты (табл. 59).

Таблица 59

Влияние расхода газа на смолосодержание при разных диаметрах горловины камеры

Расход газа в м ³ /час с. н. г.	Смолосодержание в г/м ³ с. н. г.	
	Диаметр горловины $d = 110$ мм	Диаметр горловины $d = 150$ мм
100	0,55—0,6	0,75—0,8
85—90	0,5	0,7
70	0,5	0,6—0,65
50—55	0,4	0,6—0,65
30—35	0,3—0,35	0,6—0,65
20	0,4—0,45	0,2—0,25

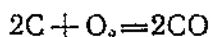
Испытания велись на смеси чурок (50% сосновых и 50% березовых), $w_{отк} = 13-25\%$.

Характер влияния расстояния горловины до плоскости фурм l на смолосодержание показан в табл. 58. Испытания велись при постоянном диаметре горловины $d = 140$ мм (табл. 60).

Таблица 60
Влияние расстояния горловины от плоскости фурм на смолосодержание

l мм Расход газа $м^3/час$	45	163	231	R $кг/м^2$ час (горловина)
20	0,15	1,65	—	540
40	0,15	1,5	1,2	1080
60	0,25	1,25	0,8	1620
80	0,60	0,8	0,8	2160
90	1,20	0,6	0,9	2430

Чем меньше диаметр горловины и расстояние до плоскости фурм, тем выше температура в горловине. Однако абсолютная величина температуры зависит в основном от интенсивности отбора газа. С увеличением часового расхода топлива температура в камере равномерно возрастает, асимптотически приближаясь к некоторому максимальному значению. При дальнейшем увеличении интенсивности отбора температура в камере будет оставаться постоянной неопределенно долгое время, так как предел скорости горения углерода по реакции



еще практически не найден.

В зависимости от интенсивности отбора температура в горловине и других участках камеры меняется. Изменяется, следовательно, и скорость сгорания и крекинга смол. Для каждого режима газогенератора существует поэтому оптимальное расстояние между горловиной камеры и плоскостью фурм, дающее минимальное содержание смолы в газе. При этом становятся понятными результаты испытаний, данные в табл. 58. При отборе газа в 20 $м^3/час$ напряжение горения в горловине невелико — всего лишь 540 $кг/м^2$ час. Поэтому высокая температура в горловине может быть обеспечена только малым расстоянием от плоскости фурм. В этих условиях l приводит к росту смолосодержания.

Но при более высоких нагрузках разница в смолосодержании выравнивается. При $l = 45$ смолосодержание равно $0,15$ $г/м^3$, а при $l = 163$ смолосодержание равно уже $1,5$, а не $1,65$, $г/м^3$.

В этом выравнивании смолосодержания влияние другого фактора — времени. С увеличением расстояния температура в горловине несколько падает, но зато увеличивается путь газа

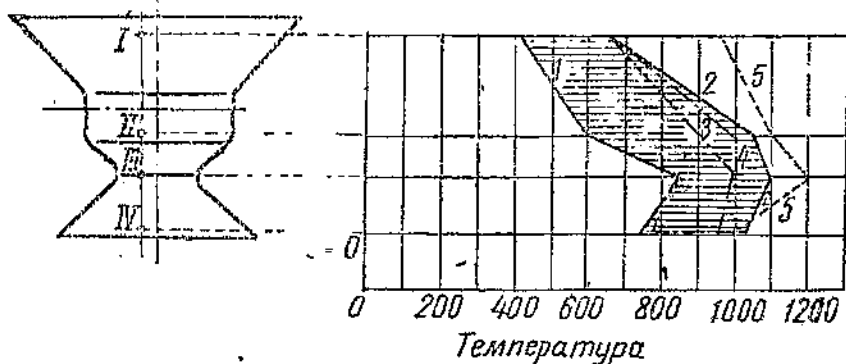
Резюмируя данные табл. 58, можно сказать, что камеры типа Берлие, работающие на малых отборах, должны строиться с меньшим l ; при повышении интенсивности горения l должно быть увеличено. У ЗИС-21, как известно, $l=115$ и $d=150$, у Г-14 $l=90$ и $d=120$.

6. Температура в камере

Таблица 61

Температура поверхности камеры газификации Г-14 в зависимости от нагрузки по опытам Прокофьевой (НАТИ)

Место замера температуры	Нагрузка двигателя в %. За 100 принята работа ГАЗ-АА на 2200 об/мин				
	15—25	45—55	65—75	90—100	120—130
Верхний конус	400—650	500—650	500—950	400—650	500—750
Под плоскостью фурм . .	650—900	750—1000	750—1100	600—1050	700—1150
Горловина	750—1000	800—1000	850—1200	850—1100	900—1050
Нижний конус	720—950	780—1000	780—1000	750—1020	800—1030



Фиг. 43. Диаграмма температур стенок камеры Г-14

Из таблицы видно, что камера газификации работает в очень тяжелых условиях. Колебания температур при постоянной нагрузке (фиг. 43) достигают для одной и той же точки поверхности 200—400°. Расстояние между фурмами, через которые проходит холодный первичный воздух, и горловиной, стенки которой нагреваются до 1000—1200°, обычно не превышает 100—120 мм. Асимптотический характер нарастания температур в камере при увеличении отбора газа хорошо виден из табл. 61.

Табл. 62 также показывает характер изменения температуры в зависимости от отбора. Температура замерена в 130 мм от плоскости фурм в цилиндрической камере экспериментального газогенератора.

Таблица 62

Влияние расхода газа на температуру в слое топлива
по опытам Мезина (НАТИ)

Расход газа в м³/час	Температура в 130 мм от плоско- сти фурм	Расход газа в м³/час	Температура в 130 мм от плоско- сти фурм
35	1050	70	1200
50	1130	80	1210

7. Подогрев бункера и первичного воздуха

Исследования, проведенные в НАТИ с газогенератором НАТИ-3, соответствующим по размерам газогенератору Г-14, показали благотворное влияние подогрева топлива в бункере на процесс газификации. Подогрев бункера, производимый за счет тепла генераторного газа, интенсифицирует подсушку и сухую перегонку топлива. Мощность двигателя при этом увеличивается приблизительно на 15% (табл. 63).

Таблица 63

Влияние подогрева бункера и первичного воздуха на мощность
двигателя

Бункер	Воздух	Среднее эффектив- ное давлени- е P_e кг/см²	N_e л. с.	Увеличение мощности в %	Падение N_e в % от работы на бензине
Без подогрева	Без подогрева	3,55	27,2	0	32,5
	С подогревом	3,71	28,4	4,2	29,5
С подогревом	Без подогрева	4,03	30,8	13,2	24,5
	С подогревом	4,10	31,3	15,0	22,3

Значительно меньший эффект дает подогрев первичного воздуха. Усложнение конструкции, неизбежное при подогреве первичного воздуха (добавление третьей перегородки, фиг. 34), не оправдывается получаемым выигрышем в мощности. Поэтому в большинстве современных конструкций подогрев воздуха отсутствует. Отсутствует подогрев воздуха и в газогенераторах ЗИС-21 и Г-14.

Однако положительная роль подогрева бункера не исчерпывается интенсификацией процесса сухой перегонки. Проходя через кольцевое пространство между наружным кожухом генератора и стенкой бункера, газ теряет часть физического тепла. В примерном тепловом расчете древесного газогенератора потеря тепла боковой поверхностью газогенератора составляет 91% от общих потерь на охлаждение. Очевидно, если бы продукты газификации отбирались у газогенератора непосредственно при выходе из топливника, эти 91% от $U_{окл}$ должны бы прибавляться к физическому теплу газа. Чем выше место отбора газа, тем ниже температура газа при выходе из генератора. Согласно опыту Кюне и Коха при испытании газогенератора Имберта эта температура в зависимости от числа оборотов двигателя колебалась от 230 до 281°. Испытания на том же двигателе (Кемпер), но с газогенератором Годг, у которого отбор газа значительно ниже по высоте бункера, дали колебания температур в пределах 439—475°.

Температуры, полученные при испытании газогенератора НАТИ-3, даны в табл. 64.

Таблица 64

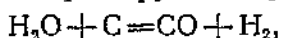
Разгон газогенератора НАТИ-3

Время от начала розжига в мин.	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Температура газа после генератора	166	240	275	299	310	321	334	345	365
Температура газа при выходе из камеры газификации	450	720	800	868	882	890	898	825	865

Постепенный рост температуры газа объясняется тем, что влажность газифицируемого топлива не остается постоянной. Подсушка топлива в бункере заканчивается значительно раньше, чем израсходуется весь запас загруженных чурок. Поэтому к концу процесса газификации действительная влажность топлива меньше, чем вначале. В тепловом балансе газогенератора величина U_v (расход тепла на испарение воды) все время уменьшается и, следовательно, U_v должно возрасти. Примерный тепловой расчет показывает, что даже при газификации абсолютно сухой древесины количество полученной химической воды было бы вполне достаточно для ведения реакции водяного газа.

При расходе в 1145 кг топлива влажностью $w=20\%$ количество гигроскопической влаги, участвующей в процессе полу-

чения 100 кг-молей сухого нормального газа (см. примерный расчет), равно 229 кг. Количество химической воды (вода Дюлонга) равно 443 кг. Итого в процессе участвуют 672 кг воды, что составляет около 59% от всего веса топлива. Из этой массы воды только 324 кг реагируют с углеродом по реакции

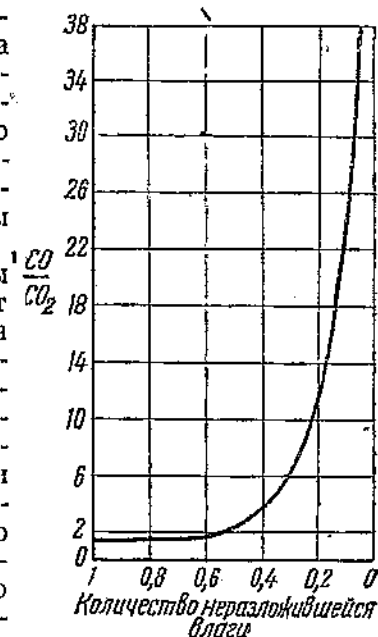


остальные 348 кг переходят в газ.

Эта вода является по существу балластом для процесса газификации. Высокая влажность топлива уменьшает теплотворную способность газа и способствует падению мощности двигателя при его переводе с бензина на генераторный газ. Однако при газификации абсолютно сухой древесины температура в активной зоне чрезмерно возросла бы, повысилась бы также и температура газа при выходе из генератора. Например, в примерном расчете температура газа возросла бы с 254 до 398°. Поэтому небольшой процент влажности (около 6—8) можно признать даже полезным для процесса газификации. К сожалению, эта норма очень далека от реальных значений влажности воздушно-сухих чурок, для которых $w = 16—18\%$. На фиг. 44 даны результаты испытаний газогенератора Имберт на дровах различной влажности. Испытания показали, что увеличение влажности топлива от 0 до 10% мало отражается на теплотворной способности рабочей смеси, несмотря на то, что состав газа при этом существенно меняется.

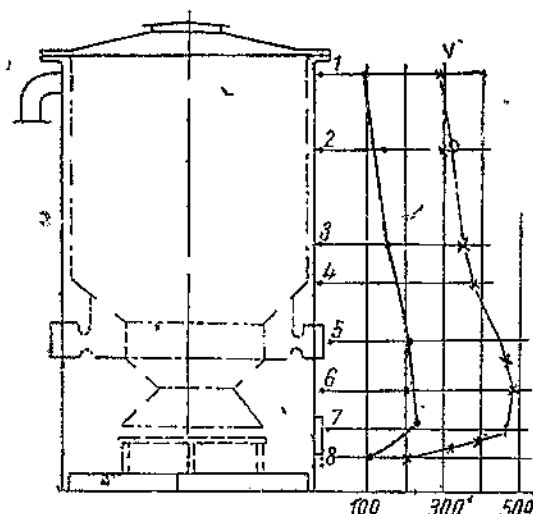
Эвакуация избытка паров воды из бункера газогенератора позволяет газифицировать более влажные сорта топлива. С этой целью бункер изготовляется двухстенным. На внутренней стенке бункера наносится несколько рядов щелевидных треугольных отверстий, через которые и отсасываются пары воды. Отсос производится при помощи эжекторного действия выхлопных газов. Для отвода паров воды из бункера можно также использовать перепад давлений между бункером и каким-либо другим местом в газогенераторной установке. Серийные автомобильные газогенераторы работают без приспособлений для отвода пара из бункера.

Результаты замеров температур на поверхности газогенератора Г-25, проведенных инж. Карасевым, даны на фиг. 45. Колебания в температурах вызваны изменениями, происходящими в газогенераторе за время газификации. Этими изменениями



Фиг. 44. Влияние влажности топлива на процесс газификации.

являются уменьшение высоты слоя и гигроскопической влажности топлива, изменение структуры восстановительного слоя и т. д.



Фиг. 45.
Температурный
режим газо-
генератора
Г-25.

8. Зольник

В газогенераторах ЗИС-21 и Г-14, как и в газогенераторе Имберт, нет колосниковой решетки. Поэтому конструктивной границей между камерой газификации и зольниковым пространством в этих газогенераторах может считаться нижняя кромка топливника.

Формула (167), служащая для определения объема зольника, может быть изменена следующим образом:

$$V_{\text{зол}} = \frac{A g_e N_e (1+z) t \cdot 1,3}{\gamma_{\text{оч}} 100} \text{ л}, \quad (188)$$

где $G_{\text{нас}}$ — заменено произведением $g_e N_e$,

g_e — удельный расход топлива в кг/э, с. ч.,

N_e — эффективная мощность.

Ведя расчет на максимальную мощность и выбирая следующие значения параметров: $A=1\%$ и $z=0,2$, $\gamma_{\text{оч}}=0,346$, $g_e=0,9$, получим: $V_{\text{зол}}=0,0405 t N_e$ л.

Отсюда удельный объем зольника для древесного газогенератора

$$V_{\text{зол}} = 0,0405 t, \quad (189)$$

где t — время между чистками зольника.

У газогенератора Г-14 объем зольника 0,8 л и, следовательно, время t равно около 20 час. Действительное значение t , конечно, значительно больше, так как газогенератор большую часть времени работает не на полной мощности. Кроме того, значительная часть золы уносится газом в очистители.

9. Газогенераторы, работающие по горизонтальному процессу

Газогенераторы, работающие по горизонтальному процессу, прочно вошли в советское автотракторное хозяйство. Даже при поверхностном знакомстве конструкция их поражает предельной простотой. В цилиндрическую камеру газификации вставлена горизонтальная воздушная фурма, охлаждаемая водой. Напротив фурмы, у стенки камеры, установлена вертикальная колосниковая решетка. Газоотводный патрубок расположен несколько ниже фурмы. Откидное дно генератора позволяет производить очистку камеры от золы. Нужен был почти двадцатилетний труд талантливых конструкторов и исследователей, чтобы прийти к конструкции, почти ничем не отличающейся от упрощенной схемы. Определим основные параметры газогенератора Г-23, установленного на грузовике ЗИС-5. Нижняя часть генератора сварена из малоуглеродистой стали толщиной 6 мм. Фурма глубоко введена в слой топлива. Раскаленная активная зона, принимающая грушевидную форму, расположена в толще топлива, служащего прекрасной тепловой изоляцией. Температуры, замеренные в активной зоне генератора Гоэн-Пулен, даны в табл. 65.

Таблица 65
Температура в газогенераторе
Гоэн-Пулен

Место замера температуры	Температура при газификации	
	древесного угля	антрацита
У выхода фурмы . .	1100°	1300°
В середине зоны горения	1670°	1800°

Секундный объем газа, проходящий через активную зону, может быть подсчитан по формуле

$$Q = \frac{L + E}{2} \cdot \frac{Q_{\text{дв}}(t + 273)}{3600 \cdot 273} \text{ м}^3/\text{сек.}$$

Для древесного угля можно принять $L = 3,4 \text{ м}^3/\text{кг}$, $E = 4,7$ и $t = 1300^\circ$. Двигатель ЗИС-5 с газогенератором Г-23 развивает мощность около 46 л. с. При удельном расходе 0,6 кг/з. с. ч. часовой расход топлива составит $G_{\text{дв}} = 27,6 \text{ кг/час.}$

Тогда

$$Q = \frac{3,4 + 4,7}{2} \cdot \frac{27,6(273 + 1300)}{3600 \cdot 273} \approx 0,180 \text{ м}^3/\text{сек.}$$

Объем грушевидной активной зоны равен около 3,5 л. Отсюда время контакта газа с поверхностью активного слоя равно

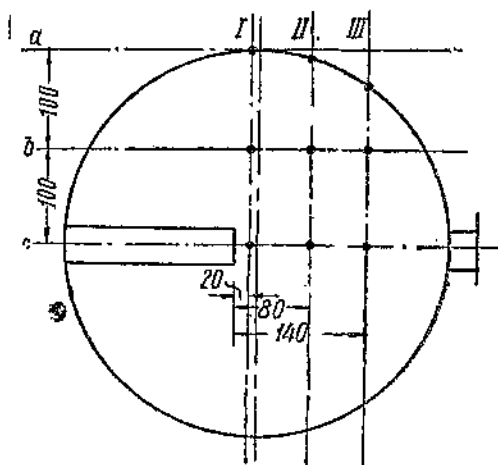
$$\tau = \frac{V_{\text{акт}}}{Q} = \frac{0,0035 \cdot 0,5}{0,180} \approx 0,01 \text{ сек.}$$

Такое малое время контакта и, следовательно, большая скорость газового потока вполне обеспечивают протекание скоростного процесса в газогенераторах этого типа.

10. Исследование активной зоны газогенератора Г-21

Исследование активной зоны газогенератора Г-21, проведенное с большой тщательностью в НАТИ инж. Г. Г. Токаревым, позволяет сделать ряд интересных выводов о работе газогенераторов типа Гоэн-Пулен.

В этом исследовании производился отбор газа в ряде точек, расположенных в плоскости фурмы (фиг. 46а). Анализ газа дает характеристику динамики газообразования в горизонтальном слое топлива. Опыты производились с древесным углем и антрацитом следующего состава (табл. 66):



Фиг. 46.
Места отбора
газа в опы-
тах с газо-
генерато-
ром Г-21.

Таблица 66

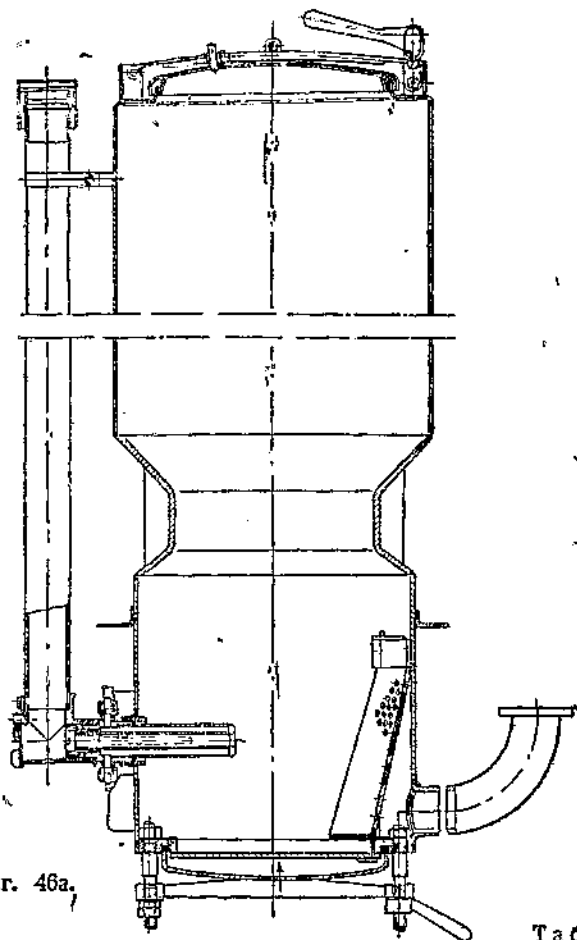
Химический состав топлива, примененного при исследовании газогенератора Г-21

Топливо	W ^p	A	C	H	O+N	S
Древесный уголь . . .	12	2,9	84,2	3,2	9,7	—
Антрацит	6	5,1	90,71	1,57	1,88	0,74

Места отбора газа при работе на древесном угле показаны на фиг. 46. Состав газа в зависимости от места отбора дан в табл. 67.

Из таблицы видно, что в 20 мм от фурмы содержание CO_2 в газе равно 6,5%, а CO отсутствует вовсе. Количество O_2 достигает 14,1%. Следовательно, активная зона не начинается непосредственно у выходного отверстия фурмы. Это и понятно. При диаметре выходного отверстия $d_{\text{ф}} = 18$ мм и расходе воздуха около 55 м/час³ (при $n = 1700$ об/мин, на которых велось испытание) скорость воздуха при выходе из фурмы около 60 м/сек.

При такой значительной скорости воздушного потока живая сила струи отодвигает слой топлива от фурмы.



Фиг. 46а.

Таблица 67

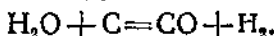
Результаты зонального исследования газогенератора Г-21
Опыты инж. Токарева

Место отбора газа	Сечение I			Сечение II			Сечение III		
	(20 мм от фурмы)			(80 мм от фурмы)			(140 мм от фурмы)		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c
Состав газа									
O ₂	0,2	0,2	14,1	0,6	0,1	3,8	0,6	0,15	0,1
CO ₂	0,8	0,3	6,5	3,0	0,1	14,7	2,4	0,1	0,2
CO	34,9	35,6	0	29,8	35,3	31,6	30,7	35,6	35,4

Однако в 80 мм от фурмы, т. е. всего лишь на расстоянии 60 мм от места первого замера, состав газа резко меняется: содержание O_2 снижается до 3,8%, $CO_2=4,7\%$ и $CO=31,6\%$;

относительно большое количество CO_2 свидетельствует о том, что процент газификации еще далеко не закончился. На расстоянии 140 мм от фурмы содержание $O_2=0,1\%$, $CO_2=0,2$ и $CO=35,4\%$.

Увеличение содержания CO могло произойти по двум причинам: за счет реакции восстановления CO_2 и разложения паров воды по уравнению



Но роль последней реакции на этом расстоянии от фурмы незначительна, так как содержание H_2 не превышает здесь 0,3—0,5%.

Следовательно, приходится констатировать, что в скоростных газогенераторах типа Гозн-Пулен, несмотря на ничтожно малое время контакта, роль восстановительных ре-

Фиг. 47. Зависимость константы скорости реакции $CO_2 + C = 2CO$ от температуры по опытам Адамса и Клеменса.

акций вполне ощутима. Это происходит потому, что при газификации древесного угля и антрацита в камере развиваются значительные температуры, достигающие 1300—1800°. Зависимость константы скорости реакции восстановления CO_2 с увеличением температуры быстро растет (фиг. 47).

Решая уравнение

$$k_1 z = \frac{2,303}{1+a} \lg \left(\frac{1}{a - \frac{1-a}{2} x} \right) + C$$

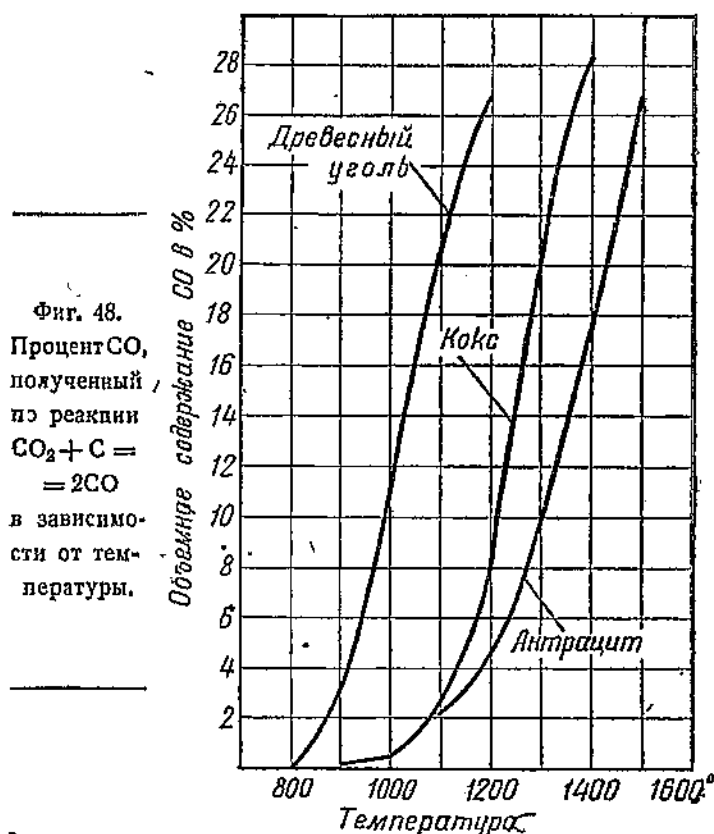
относительно x (содержание CO в газе) и считая $a=0,21$, получим:

$$x = 0,347 - \frac{1}{0,605 u}, \quad (190)$$

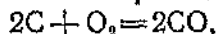
где

$$\lg P = \frac{k_1 z + 2,58}{0,81}.$$

Очевидно, с увеличением константы скорости реакции и времени контакта содержание СО в газе будет расти, асимптотически приближаясь к максимальному значению — 34,7%. Интересно отметить, что это содержание СО соответствует идеально-воздушному процессу. Но в ряде точек, достаточно удаленных от фурмы, содержание СО превышало эту теоретически



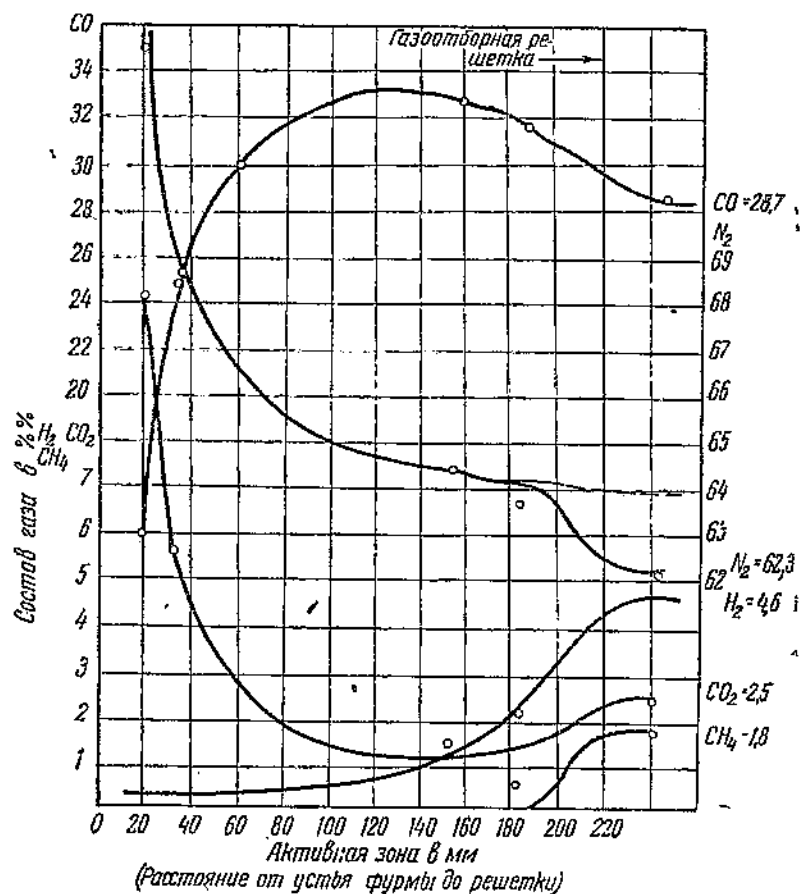
возможную концентрацию. В табл. 67 указано содержание СО 35,3 и 35,6%. В идеально-воздушном процессе единственным источником образования СО является реакция



в реальном же процессе газификации влажного топлива большое значение имеет и реакция водяного газа, также обеспечивающая выход СО.

Длина активной зоны (от фурмы до решетки) равна в газогенераторе Г-21 220 мм. Изменение состава газа по длине зоны при газификации древесного угля дано на фиг. 49. Кривые указывают на то, что изменение содержания СО происходит по всей длине зоны, причем теплотворная способность газа растет.

Изменение состава газа происходит также и у самых стенок камеры, расположенных по обеим сторонам фурмы. Таким образом, несмотря на то что раскаленное ядро зоны имеет



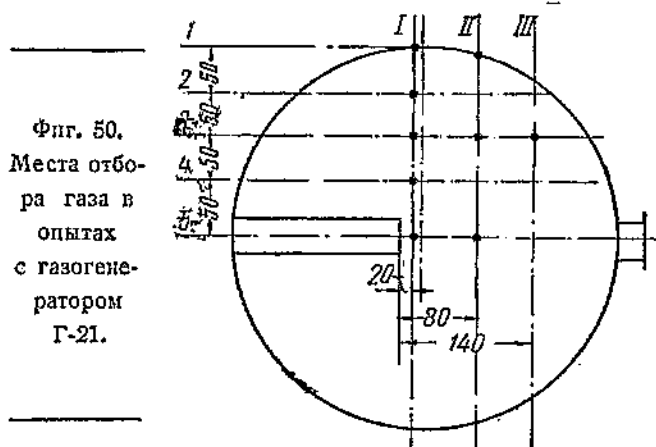
Фиг. 49. Изменение состава газа по длине зоны Г-21 при газификации древесного угля.

грушевидную форму, направленную широким концом к колосниковой решетке, процесс газификации протекает и за границами этой условной зоны. Учитывая это обстоятельство, правильное считать время контакта равным 0,01–0,02 сек.

На фиг. 50 показаны места отбора газа в плоскости фурмы при работе двигателя с $n=1100$ об/мин. Результаты анализа газов даны в табл. 68.

Уменьшение числа оборотов двигателя с 1700 до 1100 об/мин увеличивает время контакта примерно на 50%. Несмотря на то что в этом диапазоне чисел оборотов газогенератор продолжает работать на скоростном режиме, состав газа подвергся некоторым изменениям. Отмеченные колебания в составе газа отражают

влияние редуционных процессов, роль которых с понижением числа оборотов возрастает. Например в 80 мм от фурмы состав газа при $n=1700$ об/мин следующий: 3,8% O_2 , 14,7% CO_2 , 31,6% CO ; при $n=1100$ об/мин 0,15% O_2 , 0,05% CO_2 и 39,5% CO , влияние редуции CO_2 несомненно.



Фиг. 50.
Места отбора
газа в
опытах
с газогене-
ратором
Г-21.

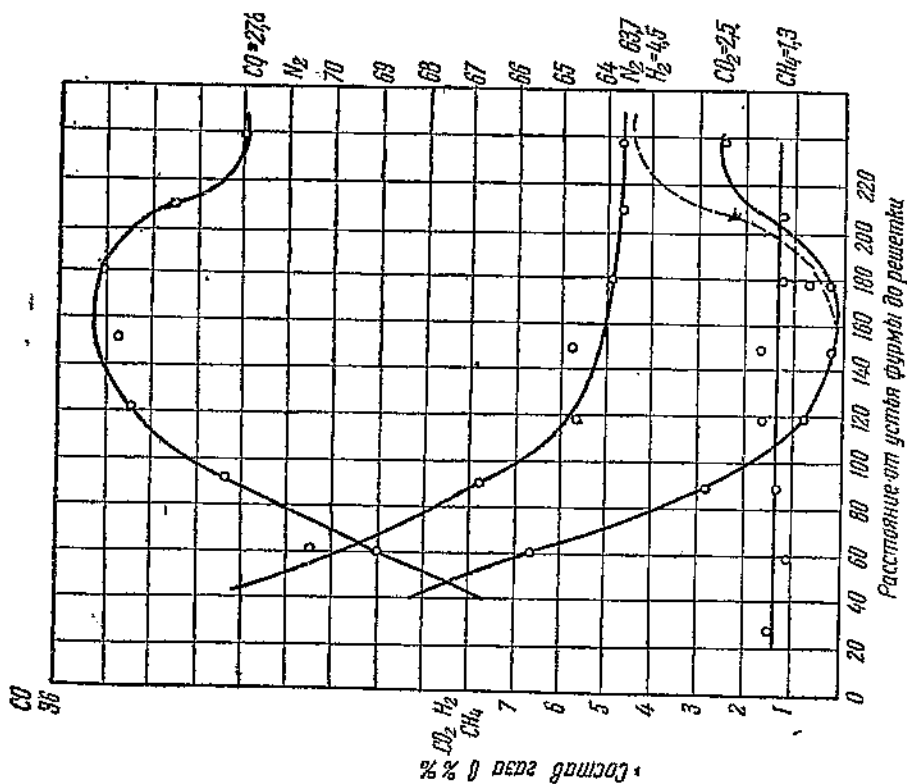
Таблица 68

Результаты зонального исследования газогенератора Г-21

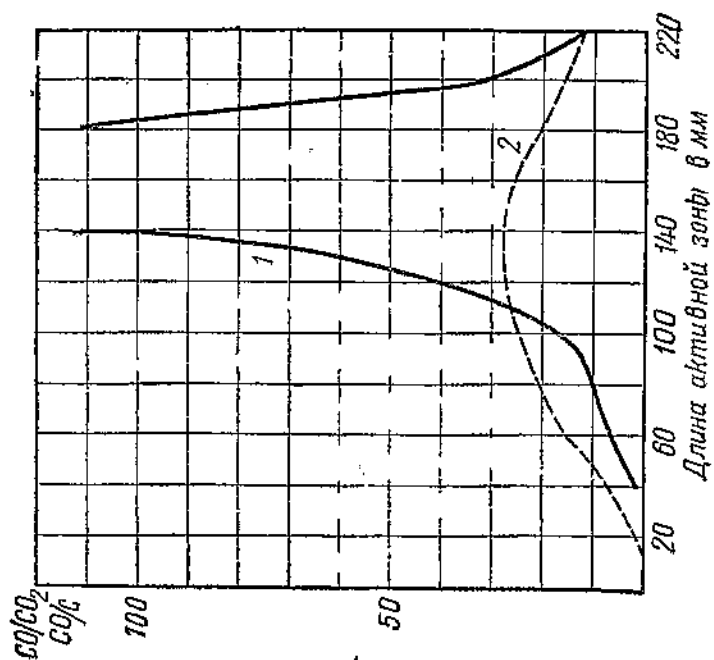
Сечения по горизонтали (см. фиг. 1)	Сечение I			Сечение II			Сечение III		
	O_2	CO_2	CO	O_2	CO_2	CO	O_2	CO_2	CO
1	0,15	1,6	32,8	0,5	2	31,5	—	—	—
2	0,1	0,15	35	—	—	—	—	—	—
3	0,1	0,3	35,2	0,1	0,15	35,8	0,05	0,1	35,1
4	0,3	0,6	20,3	—	—	—	—	—	—
5	19,9	1,2	0,4	0,15	0,05	39,5	—	—	—

Газификация антрацита несколько отличается от газификации древесного угля. На фиг. 51 показано изменение состава газа по длине активной зоны при газификации антрацита в газогенераторе Г-21. На фиг. 52 показано изменение отношения $\frac{CO}{CO_2}$ для антрацита и древесного угля в той же зависимости. Почти до половины длины зоны это отношение для древесного угля больше, чем для антрацита. Однако вскоре отношение $\frac{CO}{CO_2}$ для антрацита бурно поднимается вверх, достигая огромных значений—300—350. У колосниковой решетки это отношение для обоих видов топлива снова выравнивается.

И для газогенераторов типа Гозн-Пулен можно поставить вопрос о значении диаметра камер. Нельзя ли уменьшить габариты газогенератора? В существующих конструкциях связь



Фиг. 51. Изменение состава газа по длине зоны Г-21 (антрацит).



Фиг. 52. Изменение отношения $\frac{CO}{CO_2}$ по длине зоны Г-21.

между длиной зоны и диаметром можно выразить следующей зависимостью:

$$d_k = (1,75 - 2,0) l_3.$$

В табл. 69 даны значения d_k и l_3 для некоторых газогенераторов этого типа¹.

Таблица 69

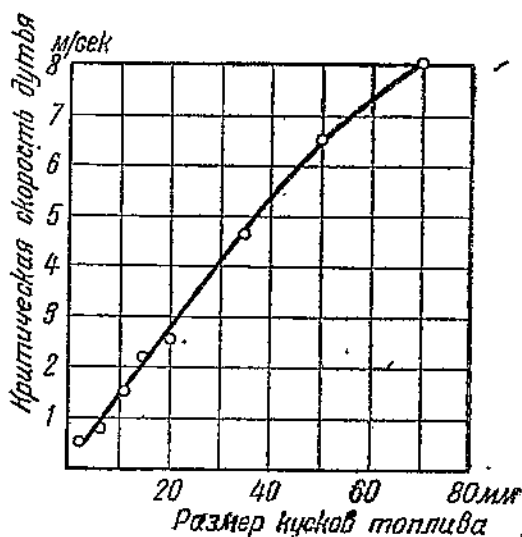
Отношение $\frac{d_k}{l_3}$ в газогенераторах типа Гоэн-Пулен

Марка газогенератора	Тип	d_k , мм	l_3 , мм	$\frac{d_k}{l_3}$
Гоэн-Пулен	Автомобильный	350	200	2,75
Г-21	"	400	225	1,78
Г-23	"	450	270	1,73
Г-34	Тракторный	660	310	2,23
Г-37	"	550	390	1,83

11. Влияние размера кусков топлива на процесс газификации

Согласно опытам по скоростной газификации, проведенным в Энергетическом институте Академии наук, с увеличением скорости дутья содержание СО в газе растет и СО₂ соответственно уменьшается. Скорость дутья, при которой устанавливается максимальное содержание СО, меняется в зависимости от вида газифицируемого топлива (табл. 47). Причиной этого являются физико-химические особенности газифицируемых топлив и разница в величинах констант скоростей реакций между углеродом и кислородом.

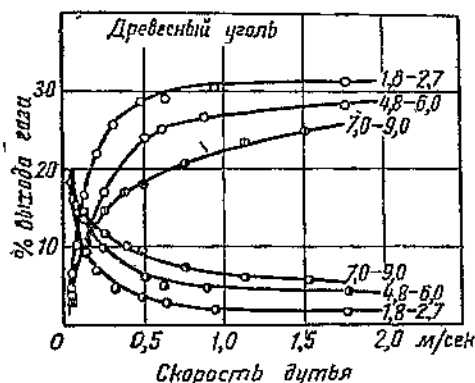
Но и при газификации одного вида топлива критическая скорость дутья, при которой редуцированный режим полностью переходит в скоростной, может менять свое значение. Основной причиной такого изменения является величина кусков топлива (фиг. 53).



Фиг. 53. Влияние размера кусков топлива на критическую скорость дутья.

¹ Уменьшение длины активной зоны лимитируется температурой колосниковой решетки. При чрезмерном сокращении этой длины имело место расплавление решетки. Ред.

Динамика роста содержания СО с увеличением скорости дутья также зависит от размеров кусков топлива (фиг. 54). При исследовании трех различных фракций древесного и электродного углей были получены данные, приведенные в табл. 70.



Фиг. 54. Влияние крупности кусков топлива на динамику роста содержания СО в газе.

Анализ кривых на фиг. 54 показывает, что с увеличением скорости дутья разница между содержанием СО в газе, полученным из углей различных фракций, постепенно уменьшается. Величина кусков топлива не влияет на температуру активной зоны. Изменение состава газа могло произойти из-за перераспределения роли первичных реакций углерода. Линейная скорость подвода воздуха должна соответствовать величине кислородной зоны. Процесс газификации есть результат целого ряда физико-химических и гидродинамических явлений. Данной скорости подачи воздуха должна соответствовать вполне определенная активная поверхность топлива. Но удельная поверхность топлива уменьшается с увеличением крупности кусков (табл. 8 и 9). Следовательно, при данной скорости дутья для сохранения необходимой величины активной поверхности топлива объем кислородной зоны должен увеличиться. Увеличение же объема кислородной зоны вызовет увеличение времени контакта продуктов газификации с топливом. Это неизбежно приведет к повышению количества сгоревшей первичной СО. Следовательно, чтобы сократить время контакта и уменьшить влияние реакции



необходимо повысить скорость подвода воздуха.

Таблица 70

Динамика роста содержания СО при повышении скорости дутья, в зависимости от крупности кусков топлива

Размер кусков угля в мм	Повышение содержания СО в газе (в %) при изменении скорости дутья от 1,0 до 1,5 м/сек	Содержание СО в газе при ско- рости дутья 1,5 м/сек в %
1,8—2,7	2,5	31
4,7—6	0,5	27,5
7—8	1,2	25

Нам кажется возможным дать еще одно объяснение повышению критической скорости дутья с увеличением размеров кусков топлива. Зависимость скорости реакции горения углерода от температуры выражается графически в виде интегральной кривой. Нижняя часть кривой, как мы говорили, соответствует кинетической области процесса горения, верхняя часть — диффузионной.

Кинетическая область расположена в интервале температур, при которых скорость химической реакции меньше скорости диффузии, переходная область соответствует равенству этих скоростей и, наконец, диффузионная область горения характеризуется тем, что скорость реакции на поверхности топлива больше скорости диффузии. Скорость диффузии кислорода сквозь пограничный слой зависит от скорости газового потока в слое топлива и температуры. Скорость реакции на поверхности топлива от гидродинамических параметров не зависит.

С увеличением размеров топлива растет его насыпной вес μ , следовательно, коэффициент свободного пространства μ уменьшается:

$$\mu = 1 - \frac{B}{r},$$

Линейная скорость воздушного дутья (при расчете на холодное дутье и свободное сечение) равна

$$w_0 = \frac{L}{F},$$

где L — расход воздуха в $\text{м}^3/\text{сек}$ при 0° и 760 мм рт. ст.

Действительная скорость газового потока в слое топлива равна

$$w_g = \frac{Q \frac{t+273}{273}}{F\mu} \text{ м/сек},$$

где Q — расход газа в $\text{м}^3/\text{сек}$ при 0° и 760 мм рт. ст., t — температура активного слоя.

Отсюда

$$Q = \frac{w_g F \mu 273}{t + 273}.$$

При одном и том же расходе газа для двух слоев с различными значениями коэффициентов свободного пространства μ получим:

$$\frac{w'_g F \mu' 273}{t + 273} = \frac{w''_g F \mu'' 273}{t + 273}.$$

Температура слоя не зависит от крупности кусков и является функцией действительного количества кислорода, поданного в единицу времени (фиг. 34). Поэтому последнее равенство может быть упрощено: $w'_g \mu' = w''_g \mu''$,

или

$$\frac{w'_g}{w''_g} = \frac{\mu''}{\mu'}.$$

Но значение коэффициента μ уменьшается по мере увеличения насыпного веса, т. е. крупности кусков топлива:

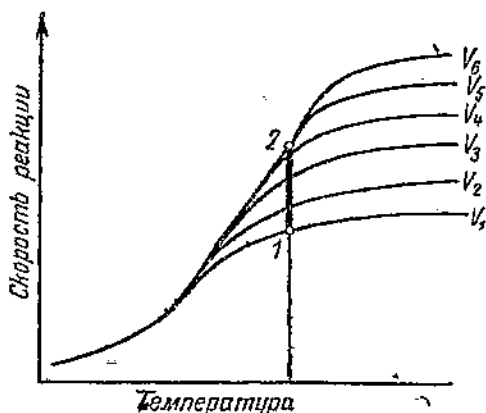
$$\frac{\mu''}{\mu'} = \frac{\gamma - B''}{\gamma - B'}.$$

Поэтому окончательно

$$\frac{w_g'}{w_g''} = \frac{\gamma - B''}{\gamma - B'}. \quad (191)$$

Итак, чем больше крупность кусков топлива, тем больше действительная скорость газового потока в камере газогенератора.

Но это увеличение w_g будет изотермическим, если Q м³/сек, отнесенное к нормальным условиям, остается постоянным. Это изотермическое повышение скорости потока увеличит скорость



Фиг. 55. Изотермическое повышение действительной скорости дутья при увеличении крупности топлива.

диффузионной части сгорания, не оказав никакого влияния на кинетическую часть процесса. Поэтому переход в диффузионную область процесса газификации, характерный для скоростного режима, сможет произойти только при более высоких температурах. В результате одного изотермического изменения действительной скорости потока процесс горения из диффузионной области сможет перейти в кинетическую (фиг. 55).

Чтобы снова перейти в диффузионную область горения, нужно сместить точку 2 вправо, т. е. повысить температуру. Для этого необходимо увеличить линейную скорость w_g подачи воздуха в топках (или отбор газа), что и подтверждается экспериментальными исследованиями.

12. Влияние добавки воды на процесс газификации

При разборе идеально-воздушного процесса было показано, что результаты его оставляют желать лучшего. Теплотворная способность газа 1053 кал/м³ и $\eta_g = 0,7$ считаются недостаточными для нормально работающего газогенератора. Одним из методов использования избыточного тепла экзотермических реакций является, как известно, подвод воды в активную зону. При газификации древесного угля и антрацита количества гигроскопической и химической влаги топлива недостаточно для ведения реакций водяного газа. Поэтому воду или ее пары приходится добавлять извне при помощи специальных приспособ-

лений, отсутствующих в серийных конструкциях Г-21 и Г-23. Лабораторные испытания газогенератора Г-21 с добавкой воды, проведенные в НАГИ инж. Токаревым, дали следующие результаты (табл. 71).

Таблица 71

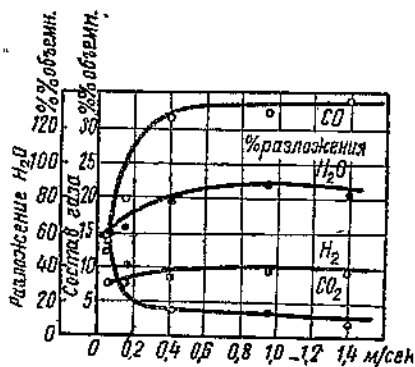
Влияние добавки воды на процесс газификации в газогенераторе Г-21. По опытам Токарева

Характер работы	CO ₂	O ₂	CO	H ₂	CH ₄	N ₂	H _к кал/м ³
Воздушно-сухой процесс	3,7	0,2	27,3	4,1	1,8	63	1085
Подача воды в жидкой фазе	4,8	0,2	26,0	5,0	1,3	62,7	1030
Подача пара	6,8	0,3	27,3	10,2	1,3	55,1	1218
Подача перегретого пара	5,2	0,3	30,3	11	2	52,8	1374

Из таблицы видно, что подача воды в жидкой фазе даже немного ухудшает процесс газификации. Подача пара, особенно перегретого, резко повышает теплотворную способность газа. Причина различного действия воды в зависимости от агрегатного состояния совершенно ясна. Перегретый пар вносит в активную зону генератора дополнительное количество тепла пропорционально степени перегрева. Вода же, введенная в слой топлива, вызывает лишний расход тепла на парообразование.

Роль паров воды, введенных в активную зону, уже частично отмеченная ранее, сводится к понижению температуры слоя, что чрезвычайно важно как метод борьбы со шлакообразованием; понижению концентрации балластного азота воздуха в газе; повышению теплоемкости смеси и, следовательно, понижению температуры газа при выходе из генератора и повышению содержания горючих компонентов. В условиях скоростной газификации, как показали опыты Гродзовского и Чуханова, роль водяного газа несколько не уменьшается. С увеличением скорости газового потока количество разложившихся паров воды растет. В опытах, проведенных в ВГИ, при газификации активированного древесного угля с частицами размером 1—3 мм, засыпанного в кварцевую трубку, в воздушное дутье подмешивались пары воды. Результаты опыта с содержанием паров воды в 14% даны на фиг. 56.

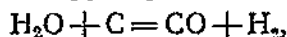
При условной скорости дутья 0,4 м/сек количество разложившихся паров воды достигает 80%, при увеличении скорости до 1,4 м/сек оно возросло до 90%. Повышенному разложению



Фиг. 56. Влияние скорости дутья на разложение паров воды.

паров воды, естественно, сопутствовал увеличивавшийся выход водорода. Интересно отметить, что, как и в чисто воздушном процессе, увеличение скорости потока повышало выход CO . Процесс разложения паров воды весь сосредоточивался в кислородной зоне, которая, несмотря на некоторое снижение температуры, не обнаружила никаких тенденций к увеличению. При высоте кислородной зоны 35 мм время контакта достигало 0,0002—0,0005 сек., что вполне обеспечивало нормальное развитие процесса.

На основании этих результатов экспериментаторы сделали вывод об активном участии O_2 в процессе разложения воды. Именно кислород активизирует реакцию



которая в условиях редукионного режима в восстановительном слое протекает достаточно медленно. Чрезвычайно интересно предположение, что разложение паров воды идет с промежуточным образованием углекислородного комплекса C_xO_y , распад которого значительно ускоряет течение реакции.

Сравнивая результаты, описанные выше, с опытами НАТИ, можно отметить существенное различие между ними. При газификации древесного угля с влажностью 12% количество H_2 на расстоянии до 80 мм от фурмы не превышает 0,3%. Дальше начинается медленный рост концентрации H_2 . На расстоянии 100 мм от фурмы содержание H_2 доходит до 0,5%, еще через 40 мм оно повышается до 1%, дальше до колосниковой решетки, т. е. на протяжении 80 мм, количество H_2 возрастает до 4,5%. Итак, в генераторе Г-21 разложение паров воды в основном протекает не в кислородной зоне, а в слое толщиной 100—120 мм.

Достаточно посмотреть на схему камеры газификации газогенератора типа Гозн-Пулен, чтобы понять причину этого кажущегося расхождения с результатами Гродзовского и Чуханова. Кислородная зона располагается около самой воздушной фурмы на расстоянии не более 40—50 мм. Через эту зону проходит лишь небольшая часть газифицируемого топлива. Основная масса угля, опускаясь в камеру из бункера, переходит границу активного конусообразного слоя в месте, где кислород уже отсутствует. Следовательно, условия газификации в газогенераторе Г-21 в отношении процесса разложения паров воды сильно отличаются от условий опытов Гродзовского, в которых все газифицируемое топливо проходило через кислородную зону. Эти условия существенно меняются, если основная масса паров воды будет поступать не из бункера в виде гигроскопической влажности топлива, а через фурму в смеси с первичным воздухом. При дополнительной подаче пара через фурму динамика образования водорода по длине зоны, конечно, носит другой характер, приближающийся к кривой на фиг. 56¹.

¹ Недостаточное разложение водяного пара в газогенераторе типа Гозн-Пулен на наш взгляд объясняется не столько изолированием паров воды от кислорода,

13. Пусковые качества газогенератора типа Гоэн-Пулен

Для газогенераторов, устанавливаемых на автомобилях, пусковые качества приобретают особое значение. Испытания, проведенные илж. Згурой, показали высокие качества газогенератора Гоэн-Пулен. Время, необходимое для раздувки газогенератора двигателем и перевода двигателя на питание газом, мало зависит от температуры воздуха и равно в среднем 1 мин. 22 сек. Интересно отметить, что для других угольных газогенераторов оно значительно больше, например на ту же операцию с газогенератором Панар затрачивается 6 мин. 50 сек., а с газогенератором Г-15—3 мин. 28 сек. Время, затрачиваемое на повторные запуски двигателя на газе, зависит от продолжительности стоянок. При увеличении стоянок от 0 до 30 мин. время запуска двигателя ЗИС-5 с газогенератором Панар возросло с 4 сек. до 3 мин. 14 сек. Для газогенератора Г-15 с двигателем ГАЗ-АА это время соответственно изменилось с 2 сек. до 2 мин. 35 сек. Для газогенератора Гоэн-Пулен с двигателем ГАЗ-АА время запуска увеличилось с 2 сек. до 21 сек.

В чем причина такой разницы во времени запуска? Критерием пусковых качеств газогенератора, несомненно, является его объемное тепловое напряжение.

Чем меньше объем активной зоны газогенератора, тем быстрее может произойти ее разогрев при прочих равных условиях. Исключительно быстрый розжиг газогенератора типа Гоэн-Пулен конструктивно объясняется наличием фуры большого диаметра.

Правда, с уменьшением объема активной зоны растет ее удельная внешняя поверхность и, следовательно, увеличиваются потери тепла на теплоотдачу в окружающее пространство (если иметь в виду тепловой баланс, отнесенный к активной зоне), но при хорошей изоляции и кратковременности запуска это не имеет большого значения.

Найдем значение параметра β для газогенератора Г-23:

$$\beta = \frac{G_{\text{газ}} h_u (1 - \eta_2)}{V_k 3600}.$$

Если сделать расчет по данным опытов НАТИ с газогенератором Г-21, то $h_u = 6423 \text{ кал/кг}$, $\eta_2 = 0,745$, $G_u = 27,6 \text{ кг/час}$ (при максимальной мощности). Объем активного слоя, выходящего за контуры основного конусообразного ядра, может быть принят равным 7 л. Тогда

$$\beta = \frac{27,6 \cdot 6423 (1 - 0,745)}{0,007 \cdot 3600} = 1800 \text{ кал/л}^3 \text{сек.}$$

сколькими температурными условиями. Аэродинамика потока пара в камере не вынуждает пар, образующийся в бункере, проходить через зону наиболее высоких температур (1600°), где движутся только продукты газификации топлива, сгорающего перед фурмой. По этой же причине будет засмаливаться двигатель, если газогенератор Гоэн-Пулен загрузить древесными чурками. Ред.

Напомним, что при максимальной нагрузке газогенераторов ЗИС-21 и Г-14 тепловое объемное напряжение их камер соответственно равно 900 и 1500 кал/м³сек. Таким образом, газогенератор, работающий по горизонтальному процессу, характеризуется большими тепловыми напряжениями. Подсчитанное значение β является средним для всей зоны. Очевидно, тепловое напряжение основного грушевидного ядра активного слоя значительно превышает найденную среднюю величину.

При работе газогенератора со скоростями газового потока больше критического значения колебания в составе газа, как известно, сводятся к минимуму. Работа двигателя делается устойчивее, и приемистость его повышается. Сказанное целиком относится к случаю подачи воздуха прямо в слой под колосниковую решетку, как это бывает при газификации по прямому процессу. При фурменной подаче воздуха необходимость в поддержании критической скорости газа во всем слое отпадает, если основная масса введенного в камеру O_2 расходуется в кольцевой активной зоне, в которой идет скоростная газификация. Такое "скоростное кольцо" в плоскости фурм имеется в газогенераторах типа Имберт, в частности в советских серийных машинах ЗИС-21 и Г-14.

VIII. ГЕНЕРАТОРНЫЙ ГАЗ КАК МОТОРНОЕ ТОПЛИВО

Получаемый в результате процесса газификации твердого топлива генераторный газ представляет механическую смесь нескольких газов, из которых каждый обладает собственной физико-химической индивидуальностью. Каждый из горючих компонентов генераторного газа по-своему влияет на работу двигателя. Химический состав газа, как уже отмечалось, колеблется в широких пределах в зависимости от вида топлива и условий газификации. Вместе с составом газа, естественно, меняется и ряд параметров, определяющих генераторный газ как моторное топливо.

1. Причина падения мощности двигателя при его переводе на генераторный газ

При переводе двигателя с бензина на генераторный газ мощность его снижается. Борьба с падением мощности до самого последнего времени являлась одной из основных проблем, связанных с переводом автогакторного парка на твердое топливо.

Эффективная мощность двигателя выражается следующим уравнением:

$$N_e = k n \eta_v \eta_e H_g, \quad (192)$$

где H_g — теплотворная способность рабочей смеси; остальные обозначения — те же, что и ранее.

При замене горючего величины всех переменных, входящих в это уравнение, снижаются. Произведем примерную оценку

этого снижения. Теплотворная способность бензино-воздушной смеси

$$H_g = \frac{h_u}{\alpha L_0} \text{ кал/м}^3, \quad (193)$$

где h_u — теплотворная способность бензина в кал/кг,

α — коэффициент избытка воздуха,

L_0 — теоретически необходимое количество воздуха для сгорания 1 кг топлива.

При $\alpha = 1$

$$H_g = \frac{h_u}{L_0} = \frac{10400}{11,76} = 885 \text{ кал/м}^3 \text{ (0° и 760 мм рт. ст.)}.$$

Теплотворная способность газо-воздушной смеси

$$H_g = \frac{H_u}{1 + \alpha L_0}. \quad (194)$$

Например для газа, принятого за основу примерного теплового расчета, получим при $\alpha = 1$:

$$H_g = \frac{1281}{1 + 1,2} \approx 582 \text{ кал/м}^3.$$

Таким образом, отношение теплотворных способностей бензино- и газо-воздушной смесей равно

$$\frac{582}{885} = 0,657.$$

Процесс смесеобразования в обычном карбюраторе заключается в распыливании и частичном испарении капелек топлива. Испарение, начавшееся в диффузоре карбюратора, значительно усиливается в трубопроводе, на пути ко всасывающему клапану, вызывая этим заметное снижение температуры. Генераторный газ, выходя из генератора, при высокой температуре (в нашем примере 254°) не всегда успевает хорошо охладиться до поступления в цилиндры двигателя. Более высокая температура газо-воздушной смеси вызывает падение коэффициента наполнения. Оценив температуру бензино- и газо-воздушной смесей в 20 и 40°, найдем, что

$$\frac{\eta_v^2}{\eta_v^0} = \frac{273 + 20}{273 + 40} = \frac{293}{313} = 0,94,$$

так как отношение коэффициентов наполнения обратно пропорционально отношению абсолютных температур рабочих смесей. Чем выше температура смеси, тем большее количество водяных паров в ней содержится. При газификации влажного древесного топлива содержание водяных паров в газе может достигнуть таких пределов, что двигатель останавливается и газопроводы оказываются заполненными конденсатом. В примерном расчете содержание паров воды в 1 м³ влажного газа равно 0,129 кг.

При температуре 254° эти пары далеки от состояния насыщения, которое наступит лишь при 60°. Если принять, что и при 40° пары останутся насыщенными, то содержание их в газе сократится до 0,051 кг/м³. Объемная доля паров воды в газе будет равна отношению парциальных давлений:

$$X = \frac{P_s}{P}, \quad (195)$$

где X — объемная доля паров воды в газе,

P_s — давление сухих насыщенных паров,

P — давление влажного генераторного газа перед смесителем.

Теплотворная способность рабочей смеси с учетом влажности газа может быть подсчитана по следующей формуле:

$$H_g = \frac{H_u(1-x)}{1 + \alpha L_0(1-x)} \text{ кал/м}^3. \quad (196)$$

Очевидно, чем меньше давление газа P , т. е. чем больше сопротивление установки, тем больше объемная доля водяных паров и ниже теплотворная способность рабочей смеси. Если принять сопротивление установки (до смесителя) равным 300 мм вод. ст., то давление P будет:

$$\frac{760 - \frac{300}{13,6}}{735,6} = \frac{738}{735,6} \approx 1$$

при показании барометра 760 мм рт. ст.

Тогда

$$X = \frac{P_s}{P} = \frac{0,075}{1} = 0,075,$$

где P_s соответствует 40°.

$$H_g = \frac{1281(1-0,075)}{1 + 1,2(1-0,075)} = 562 \text{ кал/м}^3.$$

Действительное отношение теплотворных способностей рабочих смесей будет:

$$\frac{562}{885} = 0,635.$$

Суммарное падение мощности от уменьшения теплотворной способности смеси и коэффициента подачи в этом случае

$$1 - (0,635 \cdot 0,94) = 1 - 0,596 = 0,404,$$

т. е. 40,4%.

Если принять, что индикаторный к. п. д. η_i не меняется при переводе двигателя на газ, то уменьшение η_e может быть найдено по падению механического к. п. д.:

$$\eta_e = \eta_i \eta_m;$$

$$\eta_m = 1 - \frac{N_{мп}}{N_i},$$

где $N_{тр}$ — мощность трения,

N_i — индикаторная мощность.

Если в случае работы на бензине $\eta_m = 0,8$ и $N_e = 73$ л. с., то согласно уравнению (η_m) легко найти, что $N_i = 91,5$ л. с. и $N_{тр} = 18,5$ л. с.

После перевода двигателя с бензина на газ его индикаторная мощность уменьшится согласно произведенным расчетам на 40,4%. Новое значение

$$N_i = 91,5 \cdot 0,596 = 54,6 \text{ л. с.}$$

Мощность трения зависит от числа оборотов, системы смазки и конструкции двигателя, поэтому не изменится от перевода двигателя на другой вид топлива. Тогда новое значение механического к. п. д.

$$\eta_m = 1 - \frac{18,5}{54,6} = 1 - 0,34 = 0,66.$$

Отношение η_e при работе на газе и бензине

$$\frac{\eta_e^2}{\eta_e^2} = \frac{\eta_i^2 \eta_m^2}{\eta_i^2 \eta_m^2} = \frac{\eta_m^2}{\eta_m^2} = \frac{0,66}{0,8} = 0,825.$$

Окончательное падение мощности двигателя, таким образом, будет:

$$[1 - (0,635 \cdot 0,94 \cdot 0,825)] 100 \approx 51\%.$$

2. Современные методы борьбы с падением мощности

Столь сильное падение мощности двигателя до недавнего времени считалось серьезным фактором, изменяющим технико-экономическую структуру агрегата. Двигатель ЗИС-5, дающий при работе на бензине $N_e = 73$ л. с., при переводе на генераторный газ обеспечил бы не более

$$N_e = 73 \cdot 0,49 = 35,8 \text{ л. с.}$$

В первые годы широкого развития транспортных газогенераторов одним из лучших методов борьбы с падением мощности двигателя считался наддув. Однако вскоре он был вытеснен более радикальными мерами. Расчет показывает, что при высоких степенях наддува расход мощности на компрессор сильно возрастает, и действительное приращение мощности делается незначительным. В табл. 72 даны результаты расчета наддува двигателя ЗИС-5, переведенного на генераторный газ.

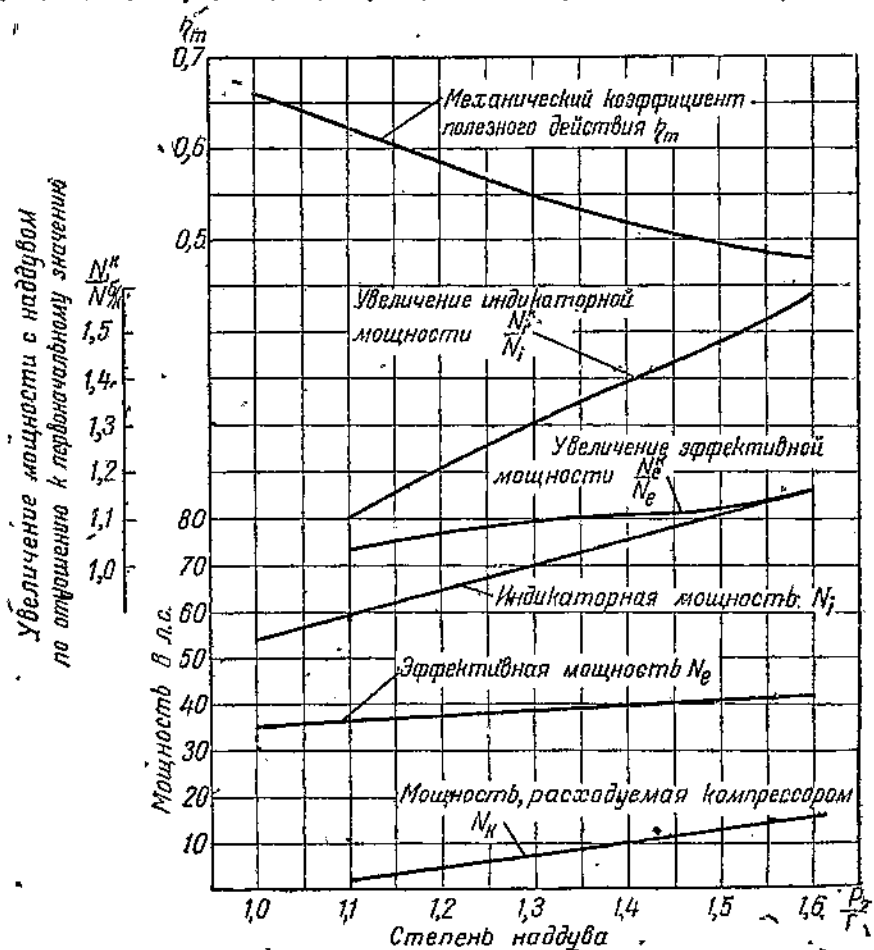
Давление на всасывание без наддува принято равным $P_a = 0,75$.

Расчет проделан для шести степеней наддува от $\frac{P_2}{P_1} = 1,1$ до 1,6 (фиг. 57).

Таблица 72

Влияние степени наддува на работу двигателя

Степень наддува $\frac{P_1}{P_2}$	Абсолютное значение P_2 кг/см ²	$\Delta P = P_2 - P_1$	Мощность в л. с.			Увеличение индикаторной мощности N_i^k	Увеличение эффективной мощности N_e^k	η_m (с компрессором)
			затрачиваемая на компрессор N_k	N_i	эффективная мощность двигателя за вычетом N_k			
						N_i^k (б/к)	N_e^k (б/к)	
1	0,850	—	—	54,3	35,8	—	—	0,66
1,1	0,938	0,088	2,27	59,7	37,13	1,1	1,04	0,625
1,2	1,020	0,170	4,56	65,2	38,44	1,2	1,075	0,590
1,3	1,105	0,255	7,40	70,7	39,3	1,3	1,095	0,556
1,4	1,190	0,340	9,95	75,2	39,75	1,385	1,11	0,527
1,5	1,275	0,425	12,80	80,7	40,5	1,485	1,13	0,502
1,6	1,360	0,510	15,40	86,0	41,3	1,58	1,10	0,481



Фиг. 57. Влияние степени наддува на работу двигателя.

Из таблицы видно, что, в то время как индикаторная мощность двигателя увеличивается почти пропорционально степени наддува, отношение эффективных мощностей $\frac{N_e \kappa}{N_e}$ растет значительно медленнее. Например увеличение эффективной мощности с 35,8 до 41,3 л.с. (на 15%) требует от компрессора $N_k = 15,4$ л.с.

Пропорционально степени наддува возрастает ряд параметров, влияющих на процесс газификации. Растут часовой расход топлива и напряжение колосниковой решетки, увеличивается скорость движения газа в слое топлива. При условии работы газогенератора на режиме, граничащем со скоростным, эти изменения могут значительно повысить к. п. д. установки. Однако при сжатии в компрессоре температура газа растет. Это вызывает необходимость увеличить охлаждающую поверхность установки, так как в противном случае коэффициент наполнения, а следовательно, и мощность двигателя уменьшатся (табл. 73).

Таблица 73

Влияние степени наддува на температуру газа после компрессора

Степень наддува $\frac{P_2}{P_1}$	Температура газа после компрессора в °Ц (температура до компрессора 27°)
1,1	46
1,2	54
1,3	60
1,4	68
1,5	76
1,6	82

Более эффективным методом борьбы с падением мощности является увеличение степени сжатия. Не требуя установки дополнительных агрегатов и сложных переделок двигателя, увеличение степени сжатия способствует повышению среднего эффективного давления P_e и улучшению термического к. п. д. η_t . Согласно опытам НАТИ увеличение степени сжатия на одну единицу повышает среднее эффективное давление на $0,22 \text{ кг/см}^2$. На автомобиле ЗИС-21 степень сжатия двигателя увеличена с 4,8 до 7. P_e при работе на генераторном газе равно $2,42 \text{ кг/см}^2$. Увеличение P_e

$$\Delta P_e = (7 - 4,8) 0,22 = 0,484 \text{ кг/см}^2.$$

Следовательно, мощность двигателя ЗИС-21 при степени сжатия 7

$$N_e = \frac{P_e V_{hн}}{900} = \frac{(2,42 + 0,484) 5,55 \cdot 2400}{900} = 43 \text{ л.с.}$$

В действительности при лучшем охлаждении газа мощность двигателя ЗИС-21 доходит до 46 л.с. Таким образом, падение мощности уменьшается до 41 %.

Последние работы, проведенные на ЗИС в НАТИ, показали, что это достижение — далеко не предел. Целый комплекс мероприятий, направленных на повышение коэффициента напол-

нения, поднятие среднего эффективного давления и термического использования агрегата, приводит к результатам, которые фактически устраняют разницу между литровыми мощностями газогенераторных и бензиновых двигателей.

Модернизация двигателя ЗИС-5, проведенная в НАТИ под руководством инж. В.А. Колосова, свелась к следующему. На двигатель была установлена новая головка со степенью сжатия $\epsilon=8,5$, диаметр всасывающего клапана увеличен с 42 до 50 мм, диаметр входного отверстия всасывающей трубы увеличен с 42 до 60 мм. Всасывающий коллектор перенесен на левую сторону двигателя и совершенно изолирован от выхлопной трубы. Нижний всасывающий клапан заменен подвесным.

Приращение среднего эффективного давления от увеличения степени сжатия в модернизированном двигателе ВК ЗИС-5.

$$\Delta P_e = (8,5 - 7) 0,22 = 0,33 \text{ кг/см}^2;$$

новое значение

$$P_e = 2,42 + 0,484 + 0,33 = 3,24;$$

$$N_e = \frac{3,24 \cdot 5,55 \cdot 2400}{900} = 48 \text{ л. с.}$$

Таким образом, мощность за счет повышения степени сжатия увеличилась на

$$53 - 48 = 5 \text{ л. с.}$$

Увеличение диаметра всасывающего клапана дает большое приращение мощности. Скорость рабочей смеси при прохождении через клапан снижается в новом двигателе с 90 до 60 м/сек (на максимальных оборотах.) Соответственно с этим уменьшится и перепад давлений и давление в конце всасывания возрастет. Связь между скоростью смеси и перепадом давления в клапане выражается общезвестным уравнением:

$$v = \sqrt{2g \frac{\Delta P}{\gamma}} \text{ м/сек.} \quad (197)$$

Приняв $\gamma = \text{const}$, получим, что

$$\frac{v_1}{v_2} = \sqrt{\frac{\Delta P_1}{\Delta P_2}},$$

откуда

$$\Delta P_2 = \Delta P_1 \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^2.$$

Приняв перепад давления в нормальном двигателе ЗИС-5 $\Delta P_1 = 0,95$, найдем:

$$\Delta P_2 = 0,95 \left(\frac{60}{90} \right)^2 = 0,09 \text{ кг/см}^2.$$

Задаваясь давлением перед клапаном $0,95 \text{ кг/см}^2$, найдем

$$P_a'' = 0,95 - 0,09 = 0,86 \text{ кг/см}^2.$$

Индикаторная мощность двигателя возрастет пропорционально увеличению коэффициента наполнения:

$$\frac{P_a'' - P_a'}{P_a'} 100 = \frac{0,86 - 0,75}{0,75} 100 \approx 15 \%$$

Согласно эмпирической формуле НАТИ среднее эффективное давление трения при $n=2400$ об/мин

$$P_t = 0,35 + 0,0005 \cdot 2400 = 1,55 \text{ кг/см}^2.$$

Среднее индикаторное давление после увеличения диаметра клапана будет

$$(3,24 + 1,55) 1,15 = 5,51 \text{ кг/см}^2,$$

откуда эффективная мощность

$$N_e = \frac{(5,51 - 1,55) 5,55 \cdot 2400}{900} = 58,5 \text{ л. с.}$$

Таким образом, приращение мощности составит

$$58,5 - 48 = 10,5 \text{ л. с.}$$

Изоляция всасывающего коллектора от выхлопного позволит понизить температуру смеси на $15 - 20^\circ$. Приняв температуру смеси перед клапаном 25° (вместо 40°), получим приращение коэффициента подачи, а следовательно, и индикаторной мощности

$$\frac{273 + 40}{273 + 25} = 1,05 \text{ (на } 5\%).$$

Среднее эффективное давление получится при этом

$$5,51 \cdot 1,05 - 1,55 = 4,25 \text{ кг/см}^2;$$

$$N_e = \frac{4,25 \cdot 5,55 \cdot 2400}{900} = 63 \text{ л. с.}$$

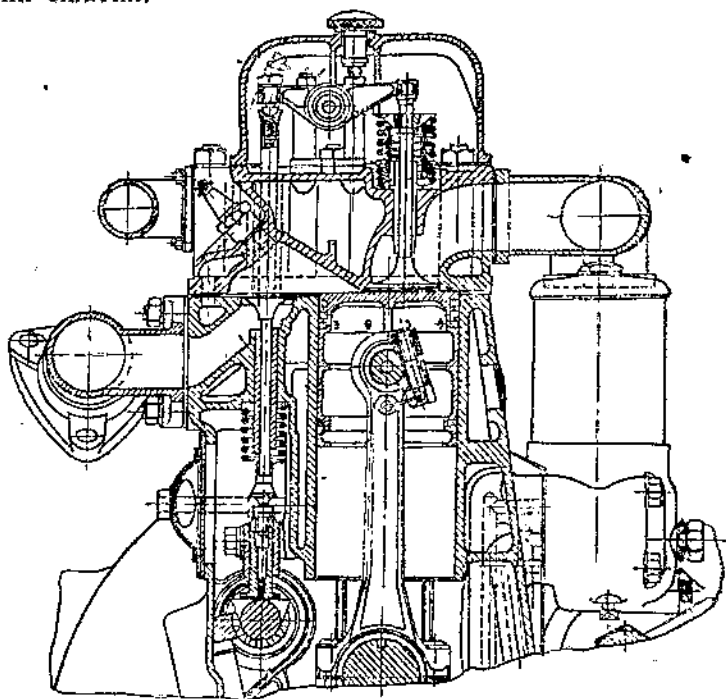
Замена нижних клапанов подвесными, по данным Рикардо, дает увеличение эффективной мощности примерно на 5%. Учитывая это приращение, получим:

$$N_e = 63 \cdot 1,05 = 66 \text{ л. с.}$$

Увеличение диаметра всасывающего газопровода, изменение формы камеры, сжатие и другие мероприятия дают повышение мощности еще на 2 л. с. Таким образом, модернизация двигателя ЗИС-5 (фиг. 58) дает на генераторном газе 68 л. с., что лишь на 6% меньше мощности ЗИС-5 на бензине.

Мы привели этот подробный расчет для того, чтобы показать, что генераторный газ как моторное топливо вполне обеспечивает двигателю такую же литровую мощность, как и на бензине, если, конечно, в конструкцию машины внести соответствующие дополнения. Эти дополнения логически вытекают

из физико-химических особенностей генераторного газа и его высоких антидетонационных качеств, допускающих большие степени сжатия.



Фиг. 58. Двигатель ВК ЗИС-5 конструкции НАТИ.

3. Характеристика горючих компонентов генераторного газа

Теплотворная способность генераторного газа определяется содержанием в нем горючих компонентов CO , H_2 и CH_4 . Незначительным количеством имеющихся иногда в газе тяжелых углеводородов C_nH_m можно пренебречь. Согласно формуле (59)

$$H_u = 30,35 \cdot \text{CO} + 25,7 \cdot \text{H}_2 + 85,7 \text{ CH}_4 \text{ кал./л}^3.$$

Индикаторная мощность двигателя может быть определена по формуле

$$N_i = K \eta_v n H_u.$$

Однако более тщательный анализ показывает, что индикаторная мощность двигателя не всегда находится в строгой зависимости от теплотворной способности газа. Теплотворная способность рабочей смеси (определяющая при прочих равных условиях количество калорий, введенных в двигатель в единицу времени) зависит от величины L_0 , которая различна для всех компонентов смеси. Теплотворная способность рабочих смесей воздуха с генераторным газом может быть различна,

если при одинаковом значении H_u содержание горючих компонентов будет меняться.

В табл. 74 даны результаты расчетов для генераторного газа различного состава, но с постоянной теплотворной способностью $H_u = 1053 \text{ кал/м}^3$. Из таблицы видно, что величина H_g колеблется в широких пределах. Следовательно, величина H_u не является достаточным критерием для суждения о качестве газа.

Таблица 74

Теплотворная способность рабочей смеси в зависимости от состава газа при $H_u = 1053 \text{ кал/м}^3$

Состав газа в объемных процентах			Теоретически необходимое количество воздуха	Теплотворная способность рабочей смеси $H_g \text{ кал/м}^3$		
CO	H ₂	CH ₄		$\alpha = 1$	$\alpha = 1,1$	$\alpha = 1,15$
34,7	—	—	0,83	576	527	470
22	10	1,5	0,91	551	505	446
18	12	2,34	0,94	541	495	436
14	15	2,84	0,97	534	487	430
11,5	16,5	3,75	1,02	523	475	416

Несмотря на одинаковое значение H_u для всех газов, разница между теплотворными способностями рабочих смесей достигает 50 кал. Но и тепловой заряд смеси также является лишь приближенным параметром для определения индикаторной мощности.

Выражение

$$N_i = k H_g,$$

где K —коэффициент пропорциональности, будет справедливо лишь в том случае, если при увеличении теплотворной способности рабочей смеси коэффициент молекулярного изменения и теплоемкость продуктов сгорания останутся постоянными. Для этого необходимо, чтобы при изменении H_g отношение $\text{CO}:\text{H}_2:\text{CH}_4$ оставалось постоянным. Такое же постоянство должно быть сохранено для отношения (двухатомные газы) $\text{CO}_2:\text{CH}_4$.

Какой же из компонентов генераторного газа обладает лучшими топливными качествами? Разберем этот вопрос более подробно. Если бы рабочая смесь состояла из одного однородного газа и воздуха, то CO могла бы сразу быть признана наиболее выгодным компонентом (табл. 75). При всех значениях α смесь CO с воздухом имеет большую теплотворную способность. Разница между тепловыми зарядами метано-воздушной и водородно-воздушной смесей с увеличением α уменьшается. В действительности рабочая смесь никогда не состоит только из воздуха и однородного газа. В генераторном газе содержание горючих

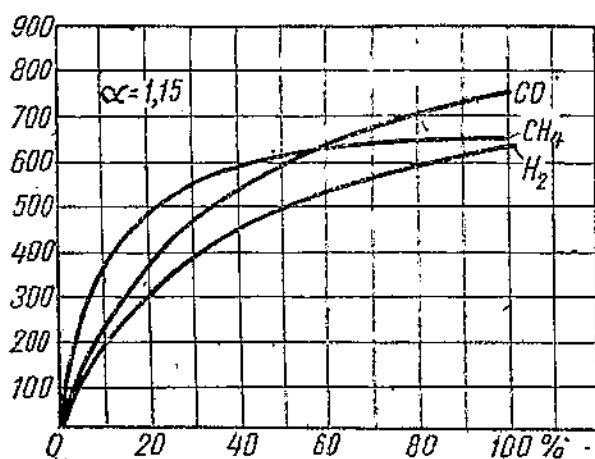
компонентов не превышает 35—40 %, так как остальную часть составляют инертные азот и CO_2 . Если исследовать теплотворную способность смеси, составленной из инертных газов одного горючего компонента и воздуха, то окажется, что порядок, отмеченный

Таблица 75

Теплотворная способность рабочих смесей горючих компонентов генераторного газа с воздухом

Род газа	Теплотворная способность газо-воздушной смеси			
	$\alpha = 1$	$\alpha = 1,2$	$\alpha = 1,4$	$\alpha = 1,6$
$\text{CO} \dots \dots \dots$	895	795	700	630
$\text{H}_2 \dots \dots \dots$	760	678	593	535
$\text{CH}_4 \dots \dots \dots$	815	690	595	526

в табл. 75, может измениться. На фиг. 59 показано изменение теплотворной способности смеси в зависимости от содержания горючей части в газе. Для большей ясности параметры для расче-



Фиг. 59. Теплотворная способность смеси в зависимости от содержания горючей части в газе при $\alpha = 1,15$.

та теплотворной способности смеси, состоящей из 20 % горючего газа, 80 % инертных газов и воздуха, даны в табл. 76.

Следовательно, в случае присутствия инертных газов (до 50—60 %) наибольшей теплотворной способностью обладает метано-воздушная смесь. Но на этом не ограничиваются пре-

имущества CH_4 . При сгорании рабочей смеси по изохоре (цикл Отто) давление конца сгорания, как известно,

$$P_z = \beta P_c \frac{T_z}{T_c}, \quad (198)$$

где β —коэффициент молекулярного изменения,
 P_c , T_c —давление и температура конца сжатия,
 T_z —температура конца сгорания.

Таблица 76

Теплотворная способность 1 м³ смеси, состоящей из горючего газа, инертного газа и воздуха $\alpha = 1,00$ для случая, когда горючий газ до смешения с воздухом составляет 20%, а инертный газ — 80%

Род газа (горючий компонент смеси)	H_u кал/м ³	L_0	Теплотворная способность рабочей смеси H_g кал/м ³
CH_4	1724	1,904	590
CO	605	0,476	510
H_2	514	0,476	348

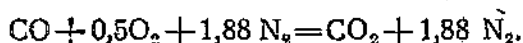
Давление P_z определяет среднее индикаторное давление P_i и, таким образом, влияет и на мощность двигателя. Коэффициент молекулярного изменения выражается следующим отношением:

$$\beta = \frac{M''}{M'}, \quad (199)$$

где M' —число молей рабочей смеси до сгорания,

M'' —число молей продуктов сгорания.

Уравнение (199) является несколько упрощенным, так как в нем не учтено влияние остаточных газов. Для CO имеем:

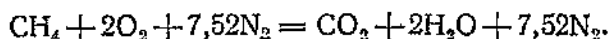


Отсюда

$$\beta = \frac{1 + 1,88}{1 + 2,38} = 0,852.$$

Такое же значение β получается при сгорании H_2 .

Сгорание CH_4 идет по следующей реакции:



Легко видеть, что β равно в этом случае единице.

Таким образом, при работе на смесях с одинаковой теплотворной способностью смесь с большим содержанием CH_4 обеспечит большую мощность. Однако из этого не следует, что газогенераторный процесс должен быть организован так, чтобы

обеспечить максимальный выход CH_4 . Большое содержание CH_4 в газе характеризует „холодный“ процесс и повышенную влажность топлива. Повышенный выход CH_4 обычно сопутствует сильному снижению содержания CO и H_2 и уменьшает теплотворную способность газа.

Исключение составляют анализы газа, взятые непосредственно после непродолжительной стоянки (10—15 мин.), когда газификация фактически прекращается и генераторный газ обогащается продуктами перегонки. Чем интенсивнее была работа генераторного газа до стоянки, тем большая будет теплотворная способность газа.

IX. СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В РАЗВИТИИ ТРАНСПОРТНЫХ ГАЗОГЕНЕРАТОРОВ

В начале этой работы было указано на историческую связь и приемственность между стационарными и транспортными газогенераторами. Развиваясь на базе старой редукиционной теории, легкие газогенераторы в продолжение многих лет не изменяли своих основных параметров. Веса газогенераторов и их габариты уменьшались очень медленно. Только в последнее время за границей появился ряд компактных автомобильных установок.

Технология газогенераторного процесса, построенная на признании необходимости восстановительных процессов, лимитировала попытки уменьшить габариты камеры газификации. Работы Мейера, Ауфгейзера, Рида и Уиллера, наконец наших советских ученых Гродзовского и Чуханова, помогли установлению новой точки зрения на механизм горения твердого топлива. Высокоскоростная газификация, теоретическая разработка которой началась лишь в 1934 г., неожиданно оказалась давно уже осуществленной практически в древесных газогенераторах типа Имберт.

В существующих легких газогенераторах Имберт и Гоэн-Пулен, подробно разобранных в этой книге, газификация протекает одновременно по редукиционному и скоростному режимам. Газогенераторы ЗИС-21 и ГАЗ-42, спроектированные, как редукиционные, оказались в большей степени скоростными, особенно на максимальных нагрузках. В скоростных газогенераторах типа Гоэн-Пулен немалую роль играют восстановительные процессы. Причины такой технологической эклектики вполне понятны. Хорошие качества этих газогенераторов являются результатом не твердого расчета и ясного понимания механизма процесса, а скорее — плодом интуиции талантливых конструкторов и исследователей. В настоящее время есть уже возможность построить скоростной газогенератор не благодаря случайному совпадению некоторых геометрических размеров, а в результате сознательного выбора соответствующих параметров.

В табл. 77 даны веса различных газогенераторных установок.

Вес газогенераторных установок

Страна	Конструкция газогенератора	Топливо	Вес установки в кг		Примечания
			общий	на 1 л. с.	
СССР	4—5 (Наумов)	Древесный уголь	171	5,7	$k = 156$. Прямой процесс
"	ГАЗ-42	Древесные чурки	425	14,5	
"	Г-31	Древесный уголь (и антрацит)	250	8,6	
Бельгия	ПИП	Древесный уголь	220	6,3	Обмурованные шахты. Прямой процесс
Франция	Барбье	" "	220	6,0	Горизонтальный процесс
"	Сагам	Древесные чурки	450	11	Опрокинутый процесс
"	Рено	" "	530	12	
Германия	Пинч	Древесный уголь	400	10	Обмурованные шахты. Прямой процесс

Из таблицы видно, что удельные веса современных установок ГАЗ-42 и Г-31 мало отличаются от конструкций 10—15-летней давности. Некоторые же старые машины, например У-5, построенная в 1928 г. и испытанная в 1933 г., намного легче новых газогенераторов. В общем весовом балансе установки немалая роль принадлежит и очистительным устройствам. Например в установке ГАЗ-42 вес газогенератора равен 116,3 кг, вес грубого очистителя — 72,5 кг и вес тонкого очистителя — 124,85 кг.

Развитие конструкции газогенератора на базе теории скоростной газификации позволит по-новому подойти к оценке допустимых минимальных габаритов. Объем камеры может быть уменьшен до оптимальных размеров. Напомним, что работа на режиме, в котором восстановительные реакции отступают на задний план, обеспечивает двигателю большую приемистость и равномерность работы. Специальная подготовка топлива, например брикетирование, поможет уменьшить и объем бункера, мало изменив время между его загрузками.

Уменьшению веса и габаритов очистителей могут способствовать кардинальные изменения методов очистки. Существующие методы очистки чрезвычайно громоздки и обладают целым рядом недостатков. Коэффициент полезного действия большинства конструкций очистителей невелик. Хорошее качество очистки покупается дорогой ценой. Лучшие матерчатые очистители, уста-

новленные на газогенераторах типа Тоэн-Пулен, дают очень высокую степень очистки газа (около 99—100%), но создают большое сопротивление. Кроме того, они не годятся для очистки газа, получаемого из битуминозного топлива. Внешняя характеристика двигателя в сильной степени зависит от сопротивления отдельных элементов газогенераторной установки.

По данным испытаний НАТИ увеличению сопротивления во всасывающем коллекторе на 10 мм рт. ст. соответствует уменьшение среднего эффективного давления у двигателя ГАЗ на 0,087 кг/см², а у ЗИС — на 0,107 кг/см².

Электрическая очистка газа известна в стационарной технике уже много лет. Опыт применения электрической очистки газа на транспортной газогенераторной установке, проведенный в Промакадемии им. Кагановича, дал вполне удовлетворительные результаты. Питание коронирующего провода, смонтированного в коробке грубого пластинчатого очистителя газогенератора ЗИС-21, проводилось первичным током в 1,5-3,5 А и напряжением 12,6 В. Сравнительные результаты нескольких испытаний очистителя с включенным напряжением даны в табл. 78.

Таблица 78

Результаты испытания электроочистителя

Расход воздуха V м ³ /час	Время пребывания воздуха в очистителе в сек.	Первоначальная запыленность г/м ³	Содержание пыли за очистителем г/м ³ (без на- пряжения)	К. п. д. очисти- теля в % (без на- пряжения)	Содержание пыли за очистителем г/м ³ (с на- пряжением)	К. п. д. очисти- теля в % (с на- пряжением)
60	4,11	4	0,56	86,0	0,004	99,9
80	2,34	3	0,795	73,5	0,021	99,4
100	1,87	2,4	0,78	67,5	0,030	98,9

С выключенным напряжением очиститель работал, как инерционный. Очистке подвергался искусственно запыленный золой воздух.

Проходя около коронирующего провода очистителя, газ не только освобождается от пыли, но и приобретает новые ценные качества — понижается. Можно предположить, что понижированный генераторный газ будет более энергично соединяться с О₂ воздуха. Большая химическая активность газа позволит несколько уменьшить предварение вспышки, отчего среднее индикаторное давление возрастет. Важным качеством электроочистителя является малое сопротивление. Опыты с электроочисткой генераторного газа еще далеко не закончены, но уже сейчас можно сказать, что электроочистка несомненно явится одним из основных компонентов транспортной газогенераторной уста-

новки ближайших лет. Дальнейшие работы должны привести к конструкции электроочистителя, вес которого не превышал бы 20—25 кг, при емкости около 20—30 л.

Существенный недостаток электроочистителя заключается в том, что в нем почти не происходит охлаждения газа. Следовательно, применение нового метода очистки допустимо только при наличии интенсивного охлаждения газа. Пример конструктивного оформления такого охлаждения дает автомобильная техника. Охладитель радиаторного типа при малых габаритах и весе позволит достаточно полно охлаждать генераторный газ.

Большие перспективы имеет сочетание радиаторного охладителя с мокрым очистителем газа „барботажного“ типа.

Такой агрегат, чрезвычайно легкий и компактный, при наличии небольшого дополнительного тонкого фильтра с успехом заменит сложную систему современной газоочистки.

В настоящее время большой объем очистителей и трубопроводов выполняет полезные функции ресивера: 30—40-секундный объем газа, уместающийся в агрегатах, расположенных между газогенератором и двигателем, несколько сглаживает колебания теплотворной способности газа. Но при работе на скоростном режиме, как уже было сказано выше, может отпасть необходимость в подобном ресивере. Новые качества двигателя, смонтированного со скоростным газогенератором, хорошая приемистость и устойчивость в работе должны быть усилены мероприятиями по повышению его литровой мощности.

Итак, дальнейшее развитие транспортных газогенераторных установок представляется как сочетание скоростных газогенераторов, работающих на брикетированном топливе с электроочисткой (или очистителем радиаторного типа) и компактным интенсивным охладителем газа. Однако помимо этих основных работ по усовершенствованию газогенераторных установок, направленных к уменьшению их веса и габаритов, нельзя забывать о так называемых „второстепенных“ задачах. Улучшение конструкции отдельных деталей установки, создание приспособлений для автоматического розжига и максимальное облегчение обслуживания чрезвычайно важны для успешной эксплуатации газогенераторов. Также важно дальнейшее улучшение и удешевление технологического процесса производства транспортных газогенераторов.

В наше время — колоссального развития автомобильного и авиационного транспорта — широкое распространение легких газогенераторов перестает носить случайный или временный характер. Все увеличивающийся рост потребления жидкого топлива быстро приближает нас к моменту, когда последние месторождения этого ценного ископаемого будут исчерпаны. Уже давно химики всех стран ищут все новых и новых заменителей нефти.

В этих условиях органического недостатка нефти развитие транспортных газогенераторов является закономерным звеном общего развития современной автотракторной техники.

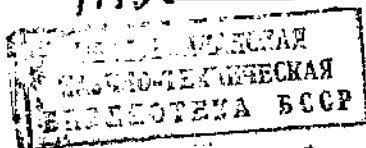
И когда с кузова газогенераторного автомобиля окончательно исчезнут неуклюжие „колонки“, висающие по бокам кабины водителя, и внешний вид машины и ее динамические качества ничем не будут отличаться от принятых для бензиновых автомобилей, никому уже не придет в голову сомневаться в праве транспортных газогенераторных установок на самостоятельное место в энергетическом хозяйстве страны.



ЛИТЕРАТУРА

1. Процессы горения угля. Механизм горения и пути интенсификации сжигания твердых топлив. Под редакцией проф. Предводителя.
2. Легкие газогенераторы автотракторного типа. Труды НАТИ, № 33, 1934.
3. И. С. Мезин, Приготовление газо-воздушной смеси и ее влияние на работу двигателя. Труды НАТИ, вып. 38, 1940.
4. И. С. Мезин, Влияние диаметра и высоты камеры газификации на химический состав газа. Труды НАТИ, вып. 40, 1941.
5. Ауфгейзер, Топливо и его сжигание.
6. Хаслам и Руссель, Топливо и его сжигание.
7. Д. Б. Гинзбург, Газификация топлива и газогенераторная установка, т. I, 1938.
8. Кюне и Кох, Испытание автомобильных газогенераторов. Гострантехиздат, 1938.
9. Ногин, Сухая перегонка дерева. Гослестехиздат, 1936.
10. Инж. Козлов, Современное состояние теории углержения, НТИ, 1929.
11. Вознесенский, Легкие газогенераторы.
12. Н. Фелькель, Влияние изменения нагрузки на работу автомобильного древесного газогенератора. ATZ, № 11 — 12, 1936.
13. Лист, Исследование работы транспортных газогенераторов на мягкой и твердой древесине (бук и ель). Издательство I. Squire, Вена 1940.
14. Фникбейнер, Древесные газогенераторы для грузовых автомобилей, VDI, 1940, Bd. 84, № 35 — 31.
15. Инж. Лейзерах, Пробег автомобилей на буром угле. „Автомобиль“, № 2, 1941.
16. Клуф, Исследование торфа как топлива для газогенераторов (в Германии) ATZ, 1940, № 18 — 25/LX, S. 465 — 6.
17. Балабанов и Соколов, Торф, как топливо для транспортных газогенераторов. „Автомобиль“, № 3, 1941.
18. Улучшение древесных транспортных газогенераторов теплотехническими мероприятиями. ATZ, 1940, № 4, 10 Der. S. 589 — 95.
19. Б. Черномордик, О некоторых особенностях применения надува в транспортных газогенераторных установках. „Автотракторное дело“, № 7, 1936.
20. Инж. Карасев, Температурный режим в газогенераторе Г-25. „Автотракторное дело“, № 11 — 12, 1940.
21. Б. Черномордик, О соответствии газогенератора двигателю. „Автотракторное дело“, № 11 — 12, 1940.
22. Инж. Москвин, Зависимость работы автотракторного газогенератора от свойств дровяного топлива. Сборник „Автомобильный мотор“, № 3, 1939.
23. Шлеппер и Тоблер, Теоретические исследования газогенераторов, Der Motorlastwagen, 1936 и 1937.
24. Б. Черномордик, Аналитический расчет основных размеров транспортных газогенераторов, „Автотракторное дело“, № 10, 1933.
25. Б. Черномордик, Легкие двигатели на генераторном газе, как технико-экономическая проблема. „Дорога и автомобиль“, № 9, 1931.

41130



ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ И НЕОБХОДИМЫЕ ИСПРАВЛЕНИЯ

Стр.	Строка	Напечатано:	Следует:
21	Табл. 8, последняя графа	$\text{м}^2/\text{м}^3$	$\text{м}^2/\text{м}^3$
37	1-я снизу	< 0	> 0
40	10-я сверху	16%	10°
45	7-я сверху	$\text{CO}:\text{CO}_2$	$\text{CO}_2:\text{CO}$
80	2-я сверху	способность	энергия
84	5-я снизу	редукционных теорий	редукционной теории
97	3-я сверху	$\text{кг}/\text{м}$	$\text{кг}/\text{м}^3$
134	15-я сверху	$(L + F)$	$(L + E)$
142	3-я сверху	фиг. 34	фиг. 4
166	18-я снизу	53 — 48 = 5 л. с.	48 — 43 = 5 л. с.
175	14-я снизу	спешной	успешной

Черномордик

ЗАМЕЧАНИЯ К ОПЕРАЦИЯМ И ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ

Стр.	Словесно	Пояснения	Словесно
12	14-я серия	список	48-49 = 5-я с. л.
13	18-я серия	фил. 34	фил. 4
14	3-я серия	(1+2)	(1+2)
15	8-я серия	м/м	м/м
16	8-я серия	редукционная теория	редукционная теория
17	8-я серия	способ	способ
18	2-я серия	CO:CO ₂	CO:CO ₂
19	10-я серия	10%	10%
20	1-я серия	< 0	< 0
21	18-я серия	м/м	м/м

вспомогательные