

ЦНИДИ

Я $\frac{136}{257}$

**ГАЗИФИКАЦИОННЫЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ
РАСТИТЕЛЬНЫХ ОТХОДОВ**

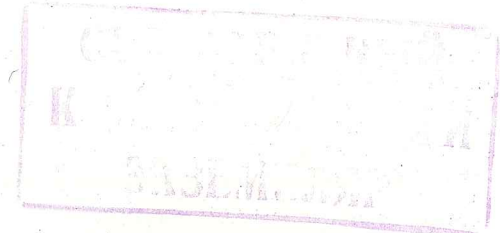
15

МАШГИЗ 1950

МИНИСТЕРСТВО ТЯЖЕЛОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ СССР
ГЛАВЛОКОМОБИЛЬДИЗЕЛЬ
ЦЕНТРАЛЬНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ДИЗЕЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ
ЦНИДИ

Л. К. КОЛЛЕРОВ

9 136
1 257



ГАЗИФИКАЦИОННЫЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ
РАСТИТЕЛЬНЫХ ОТХОДОВ

Под редакцией В. В. НИКИФОРОВА

15



ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
МОСКВА 1950 ЛЕНИНГРАД

В брошюре изложен материал, представляющий первую попытку дать в обобщенном виде результаты изучения теплотехнических свойств растительных отходов и в частности их газификационных особенностей, имея в виду получение из этих отходов генераторного моторного газа, используемого в качестве заменителя жидкого моторного топлива в двигателях внутреннего сгорания; даны краткие сведения о балансе растительных отходов в СССР и их классификация, изложены биологические особенности, теплотехнические характеристики и газификационные свойства растительных отходов и приведены материалы, характеризующие моторные свойства генераторного газа из растительных отходов.

Брошюра предназначена для инженерно-технических работников, занимающихся вопросами энергомашиностроения и газификации местных топлив.



50 - 53629



2010388940

ЛЕНИНГРАДСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ МАШГИЗА
Редакция литературы по машиностроению
Заведующий редакцией инж. Ф. И. Петисов

ВВЕДЕНИЕ

Советское энергетическое хозяйство с момента возникновения плана ГОЭЛРО начало уделять серьезное внимание выявлению местных запасов твердых топлив и изучению способов их рационального теплового использования.

Идея всемерного развития добычи местных топлив была одной из важнейших идей ленинского плана электрификации, которая осуществляется и сейчас в годы сталинских пятилеток. В связи с этим, выявление любых других источников местных твердых топлив, составление их баланса и разработка методов их энергетического использования приобретают особо важное значение для развития социалистического народного хозяйства страны.

В богатой своим разнообразием номенклатуре твердых топлив СССР, в большинстве уже достаточно подробно изученных, имеется отдельная группа топлив, которая до сих пор нередко именуется как группа «бросовых» топлив или как группа «суррогатов». В числе других к таким топливам относят: лузгу, отрубину, солому, шелуху плодов и другие топлива, представляющие огромную группу так называемых растительных отходов.

Не говоря уже о несоответствии приведенных выше терминов в применении к этим горючим отходам, такая оценка умаляет значение этих топлив, запасы которых в СССР исчисляются миллионами тонн, а сами топлива обладают высокими теплотехническими свойствами.

Причину такого положения можно объяснить, с одной стороны, сравнительной обеспеченностью народного хозяйства более широко распространенными видами твердых топлив (дрова, уголь, торф), а с другой — отсутствием достаточно всесторонне разработанных рациональных методов энергетического использования упомянутых выше так называемых «бросовых» топлив.

Если подходить дифференцированно к анализу обеспеченности твердым топливом отдельных районов и областей, то легко заметить, что, например, для южночерноземной полосы, южной части Сибири и среднеазиатских республик растительные отходы по существу играют роль топлива первостепенного значения и, в первую очередь, как топлива бытового. Особо велика роль растительных отходов для энергетики сельского хозяйства.

Среди обширных задач, поставленных партией и правительством перед социалистическим сельским хозяйством СССР на современном

этапе его развития, одна из них посвящена грандиозным работам по созданию в сельском хозяйстве своей собственной энергетической базы, своих местных энергетических систем.

Одной из технических основ решения указанной задачи является осуществление идеи комплексного использования всех местных энергетических ресурсов в соответствии с экономикой сельскохозяйственных районов и их территориальными и природными условиями.

При такой постановке вопроса неизмеримо возрастает роль растительных отходов, превращающихся в активную статью топливно-энергетического баланса, однако, вместе с тем, возникает задача изыскания наиболее эффективных методов теплового использования этих отходов.

Проводимые работы в этом направлении показывают, что при том значении, которое отводится роли двигателя внутреннего сгорания в развитии энергетики сельского хозяйства, газификация растительных отходов на моторный газ, в качестве заменителя нефтяного топлива, должна быть признана наиболее эффективным методом их теплового использования.

Интерес к растительным отходам, как мощному источнику дополнительных энергетических ресурсов в народном хозяйстве, заметно повысился в последние годы и в особенности в связи с успешными работами ЦНИДИ в области создания первых отечественных сельскохозяйственных газомоторных установок с газогенераторами для газификации соломы.

Все сказанное явилось основанием к опубликованию материала, представляющего первую попытку дать в обобщенном виде результаты изучения биологических и связанных с этим теплотехнических свойств и газификационных характеристик растительных отходов, имея в виду получение из этих горючих отходов генераторного (моторного) газа для двигателей внутреннего сгорания.

Такая трактовка вопроса позволяет представить его изложение в следующей последовательности:

- 1) Классификация растительных отходов.
- 2) Краткие сведения о балансе растительных отходов в СССР.
- 3) Биологические особенности и общие теплотехнические свойства растительных отходов.
- 4) Газификационные характеристики растительных отходов.
- 5) Моторные свойства генераторного газа из растительных отходов.

1. КЛАССИФИКАЦИЯ РАСТИТЕЛЬНЫХ ОТХОДОВ

Растительные отходы исключительно разнообразны как по характеру своего естественного строения, так и по структуре технологического отхода, получаемого в результате переработки или обработки первичного сырья.

Вместе с тем, разнообразны и физико-химические свойства этих отходов как топлива, вытекающие из их ботанических особенностей, условий произрастания, климата и почвы.

Перечисленные данные существенным образом сказываются на характере процесса горения и газификации этих топлив и предъявляют ряд требований к их подготовке в том случае, если в своем естественном виде они не могут быть использованы для этого достаточно эффективно. Действительно, например, такие растительные отходы как костра или лузга могут быть использованы для газификации без их предварительной подготовки, в то же время такие отходы как солома и полынь, обладая малым насыпным весом, а отсюда и низкой теплоплотностью в слое, должны перед газификацией пройти соответствующую подготовку. Формы и методы этой подготовки в значительной мере зависят от вида отхода, типа газогенератора и способа газификации, но в общем случае сводятся к физико-механическим (дробление, резка, холодное прессование) или в более ограниченных случаях, к физико-химическим методам (горячее брикетирование).

Имея в виду особо важное значение, которое оказывают форма и размер зерна (куска) топлива на процесс его газификации, мы и положили этот признак в основу предлагаемой классификации растительных отходов.

Такая классификация впервые дает возможность представить в виде стройной системы все разнообразие растительных отходов нашей страны и облегчить задачу их систематизации и учета. Кроме того, классификация полезна для изучения газификационных характеристик растительных отходов и выбора технологии их подготовки для газификации.

В основу предлагаемой четырехклассной классификации растительных отходов положен их основной биологический признак, определяющий естественную форму растения или той его отдельной части, которая получается в результате уборки и первичной обработки.

Исходя из этих соображений, характеристика классов растительных отходов определена следующими физическими призна-

ками: стебель, зерно двух классов крупности и, наконец, пластинка (лист).

Каждый класс классификации имеет подклассы, объединяющие отходы с более индивидуальными особенностями их строения, и, наконец, подкласс распадается на отдельные группы растительных отходов с однородными физическими характеристиками.

Таким образом, основные элементы классификации можно представить в следующем виде:

Таблица 1
Основные элементы классификации растительных отходов

Класс	Характеристика класса	Число подклассов	Наличие основных групп растительных отходов в классе
I	Цилиндрический стебель	3	8
II	Зерно размером до 10 мм	1	7
III	Зерно размером свыше 10 мм	3	3
IV	Пластинка (лист)	1	1

Общая схема классификации приводится на фиг. 1. Здесь представлены основные классы, подклассы и объединяемые этими подклассами группы растений и их отходы.

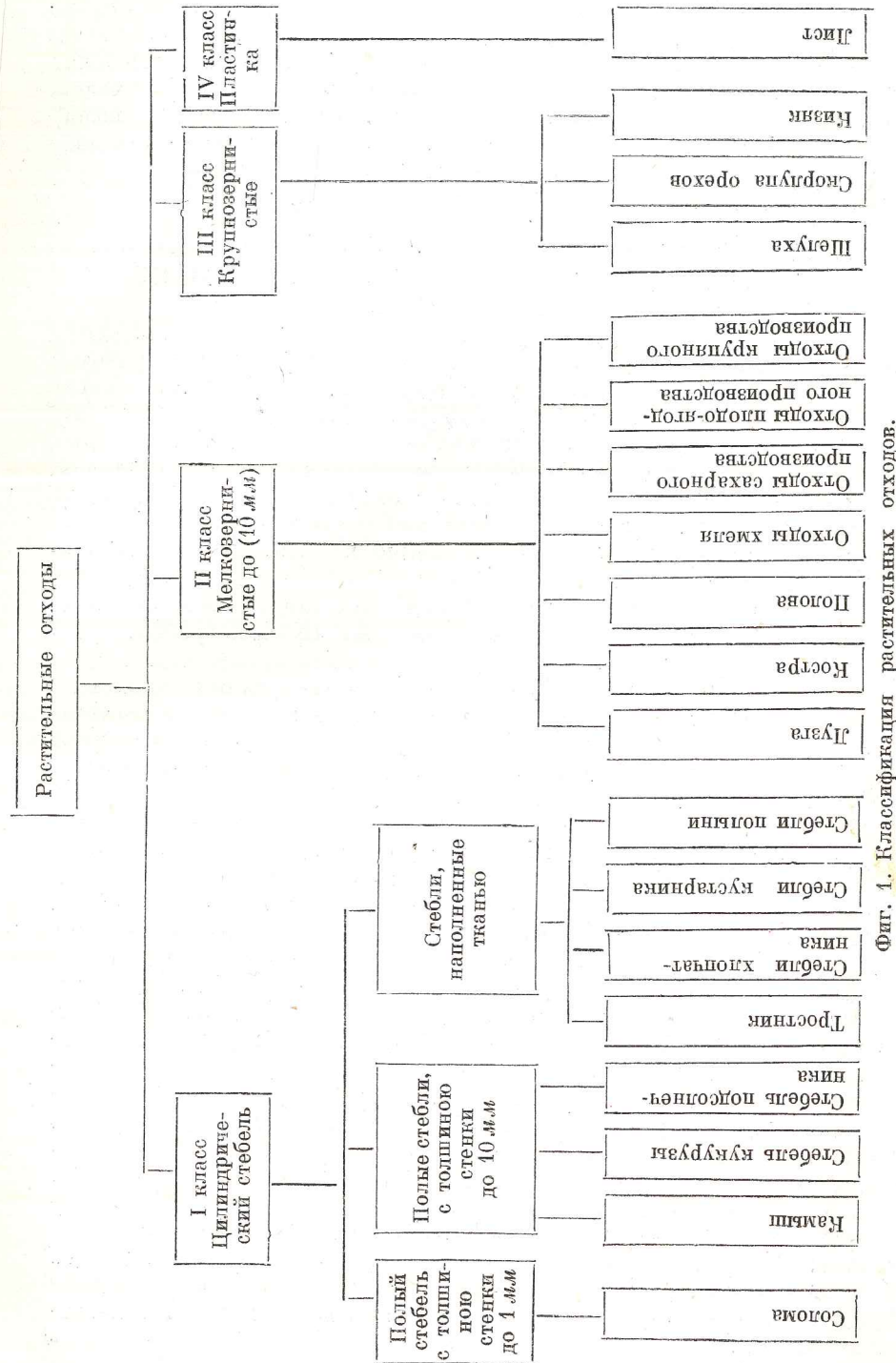
Первый класс объединяет растительные отходы, обладающие цилиндрическим стеблем, и является, по ежегодным запасам, наиболее мощным источником местных топливных ресурсов в сельском хозяйстве; класс состоит из трех групп. К первой группе отнесены отходы, обладающие полым цилиндрическим стеблем с толщиной стенки до 1 мм. Основным представителем этой группы является солома зерновых культур. Вторая группа объединяет отходы, состоящие из деревянистых стеблей с толщиной стенки до 10 мм. Сюда могут быть отнесены: стебли кукурузы, подсолнуха и камыша. Для третьей группы характерны цилиндрические стебли, наполненные тканью. В одном случае эта ткань имеет ситовидное строение (тростник), в другом — ткань плотная с мельчайшими сосудами. Основные представители упомянутых выше трех групп растительных отходов приведены на фиг. 2.

Второй класс классификации охватывает растительные отходы в виде зерен или чешуек величиною зерна до 10 мм. Все эти отходы получаются в результате либо первичной обработки культуры невдалеке от места ее сбора, либо на специальных заводах.

В классификации эта группа представлена следующими растительными отходами: лузга, костра, полова, отходы хмеля, отходы сахарного производства, отходы крупяного производства и отходы плодоягодного производства.

На фиг. 3 приведены наиболее характерные представители растительных отходов второго класса.

Третий класс классификации представлен крупнозернистыми растительными отходами, к которым мы относим: отходы хлопка, скорлупу орехов, корзинки подсолнухов и кизяк.



Фиг. 1. Классификация растительных отходов.

Четвертый, последний, класс объединяет все растительные отходы в виде пластинки, типичным представителем которых служит лист.

Насколько видно из приведенной классификации, она достаточно полно охватывает широкую номенклатуру растительных отходов, представляющих основную массу энергетического ежегодно возобновляемого топлива в сельском хозяйстве и дает возможность дифференцированно подойти к расчету их годового баланса.

2. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О БАЛАНСЕ РАСТИТЕЛЬНЫХ ОТХОДОВ В СССР И ЕГО ЗОНАЛЬНОМ ДЕЛЕНИИ

Запасы растительных отходов в сельском хозяйстве слагаются из отходов, получаемых в результате сбора и первичной обработки культурных сельскохозяйственных растений, и мобильных запасов дикорастущих (камыш, тростник и др.), доступных для сбора и транспортировки. Расчет баланса этих растительных отходов, как сырьевой базы развития сельскохозяйственных газомоторных установок, является вопросом достаточно сложным, который нельзя ограничить только учетом сырья и определением активной и пассивной частей баланса. Решение задачи о вовлечении в активный энергетический баланс сельского хозяйства растительных отходов тесно связано с распределением этих запасов по отдельным растениеводческим зонам и профилем сельскохозяйственных работ, развиваемых в этих зонах.

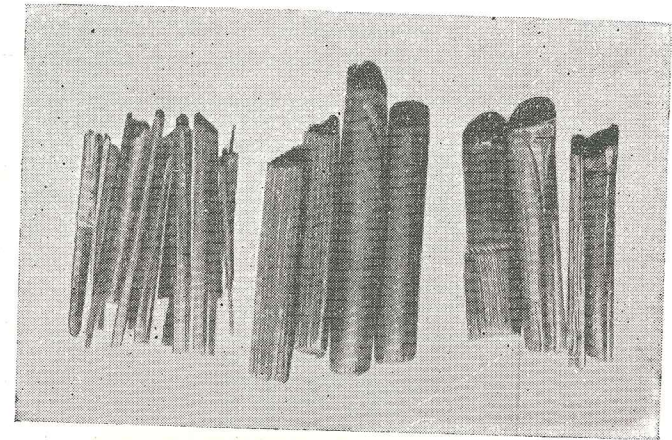
Определение таких зон сосредоточения растительных отходов на территории СССР дает возможность судить, кроме того, о характере размещения в этих зонах газомоторных установок как источников местной малой стационарной и полевой сельскохозяйственной энергетики.

Наконец, в качестве последней задачи должен быть поставлен вопрос о дифференцировании растительных отходов по направлениям их использования в указанных зонах, в том числе и расчете их запасов, возможных к использованию в качестве энергетического топлива.

Приводимые ниже итоги расчета баланса растительных отходов в сельском хозяйстве составлены на основе контрольных цифр сева культур по пятилетнему плану на 1950 г. [9] и экспедиционным материалам, полученным в результате обследования сельскохозяйственных районов УССР, Западной Сибири, Урала и ряда центральных областей РСФСР.

Главнейшим источником топливных отходов сельскохозяйственных растений, в первую очередь, являются зерновые культуры и, во вторую очередь — технические. Среди отходов этих культур доминирующее положение по ежегодным сборам принадлежит соломе.

Продолжающийся из года в год на основе передовой агротехники рост урожайности зерновых открывает большие перспективы в дальнейшем увеличении количества соломистого отхода, и есть все основания считать его одной из главных статей перспективного сводного баланса растительных отходов в сельском хозяйстве Советского Союза.



а — стебель соломы, б — стебель тростника, в — стебель камыша.



а — сбой и полова, б — отходы обработки хмелл, в — кестра льняная.



б



б

Фиг. 3. Растительные отходы второго класса классификации.

В 1940 г. сев зерновых по СССР производился на площади примерно в 100,0 млн. га. При среднем выходе соломы с 1 га в 1,2 т (для УССР этот выход составлял 1,4 т) общий ее годовой сбор составлял — 120 млн. т. Согласно расчетам, произведенным для этого года проф. С. В. Башкировым, следует, что «энергии, полученной при газификации соломы в количестве одной четверти годового сбора, было бы достаточно для вспашки 300 млн. га земли. Слой стерни высотой в 20—22 мм было бы достаточно, чтобы обеспечить уборку хлеба комбайнами».

Соломистая часть урожая выходит из молотилки комбайна в виде двух фракций: крупной соломы, сходящей с соломотранспортера, и мелкой половы, поступающей из первой очистки.

Под половой, при комбайновой уборке, подразумеваются все измельченные части растений, в том числе и те, которые в стационарных молотилках частично отходят в сбойну. При обмолоте хлеба стационарными сложными молотилками выход половы на каждые 100 частей соломистой массы составляет от 3—5% для ржаной до 10—14% для ячменной соломы, такое же количество примерно приходится и на сбойну.

Из молотилки комбайна выход половы и сбойны в несколько раз больше, чем при обмолоте стационарными молотилками, причем в отдельных случаях выход их достигает 50% всей соломистой массы.

Согласно контрольным цифрам сева сельскохозяйственных культур на 1950 г. и расчету, получаемому в результате их обработки и переработки отходов, общий годовой их выход по СССР нами исчислен в 146,87 млн. т. Из этого количества на соломистые отходы падает 132,26 млн. т, или 90%, и на отходы технических культур 14,61 млн. т, или 10%.

Наряду с отходами сельскохозяйственного производства и в особенности в тех случаях, когда их количество не покрывает потребности для энергетических целей и, в частности, для целей газификации, могут быть использованы дикорастущие травянистые растения, к которым в первую очередь следует отнести тростник, камыш и полынь. Эти отходы в первую очередь должны сыграть важную роль для газификации механизации сельского хозяйства Западной Сибири и Казахстана.

Примерные, далеко не исчерпывающие данные учета указанных энергоресурсов показывают, что ежегодно возобновляемое их количество, возможное для сбора и транспортировки к местам потребления, составляет 86,184 млн. т, что вместе с отходами культурных сельскохозяйственных растений составляет 233,054 млн. т., т. е. примерно $\frac{1}{5}$ добычи всех видов топлив в СССР в 1937 г.

Разнообразие природных условий Советского Союза определяет и характер произрастающей на его территории растительности. Эта смена растительного покрова вообще и видов культурных растений в частности дает представление о типах и свойствах этих отходов и их количествах.

Еще XVI съезд ВКП(б) поставил перед сельскохозяйственной наукой задачу, как одну из самых важных задач, изучение вопросов целесообразного использования особенностей отдельных районов

и рационального размещения культур и сортов, а также введение новых культур для обеспечения промышленности сырьем.

Районирование той или иной культуры предусматривает также ее размещение на территории, которое удовлетворяет общим требованиям плановой специализации народного хозяйства и целесообразно в отношении максимального использования природных возможностей.

В каждом географическом поясе мы найдем представителей тех или иных групп установленных нами классов классификации растительных отходов, что дает возможность, пользуясь этой классификацией, подойти к решению задачи о зональном распределении растительных отходов на территории СССР.

Сельскохозяйственная наука располагает достаточно подробно разработанными картами полеводческих районов на территории СССР и дает наглядное представление о произрастающих там культурах.

Основываясь на русском учении о зональном распределении растительности и придерживаясь границ естественно-исторического районирования, автором составлена карта сосредоточения растительных отходов на территории СССР в границах 18 зон (фиг. 4).

С точки зрения запасов этих отходов, их физико-химических особенностей и огневых свойств, интенсивности развития сельскохозяйственного производства и общей экономики зоны перечисленные зоны можно назвать в отношении направления энергоиспользования отходами зонами газификации механизации сельского хозяйства. Каждая из приведенных зон характерна своей структурой баланса, показывающей направление использования растительных отходов и их запасы, возможные для газификации.

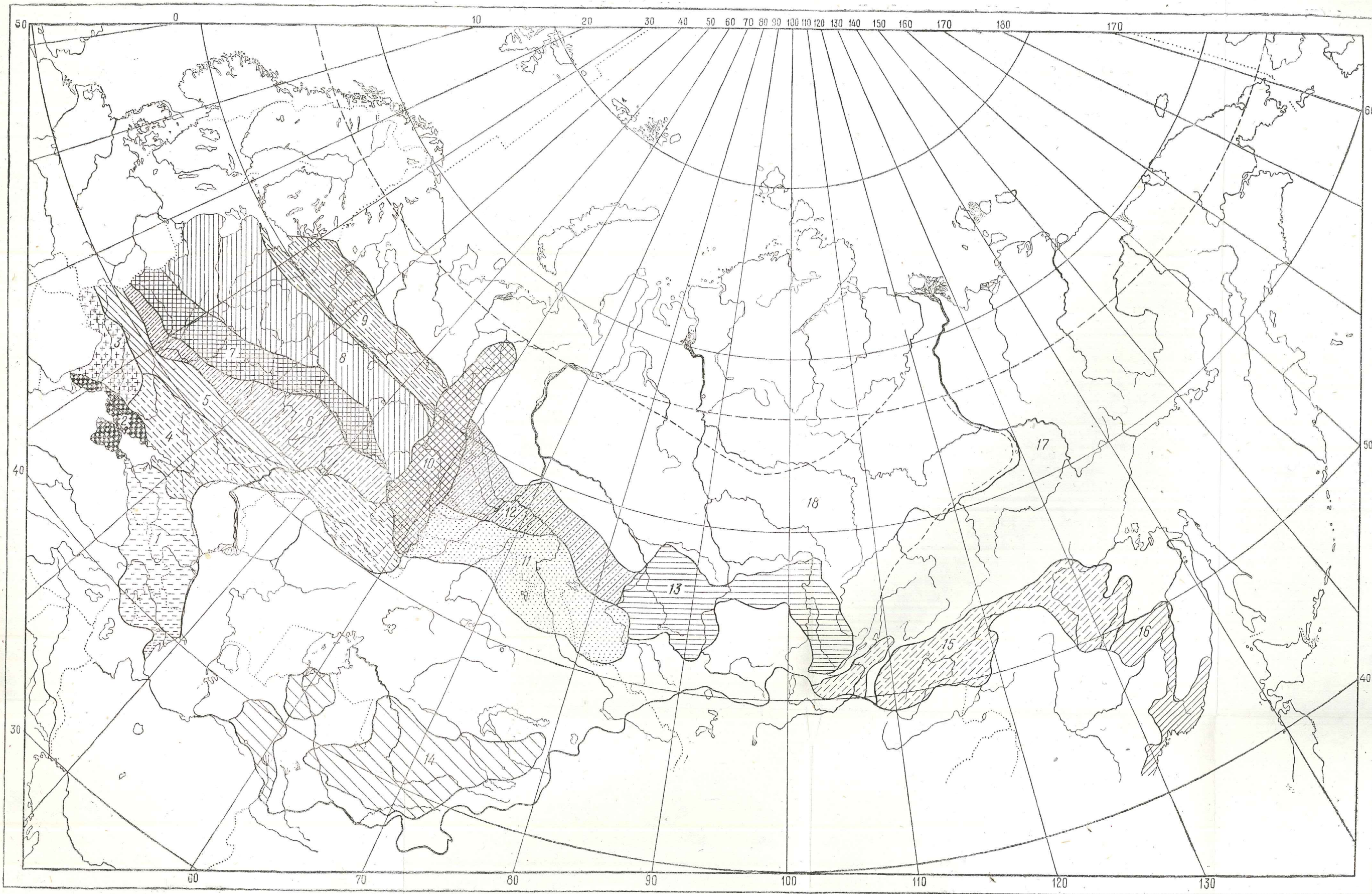
Валовой годовой баланс растительных отходов по зонам приведен в табл. 2. Здесь учтены отходы, получаемые в результате первичной полевой обработки культур, и также дикорастущая травянистая растительность (камыш, тростник, полынь) на площадях, доступных для сбора и транспортировки. В конце таблицы указаны запасы отходов культурных растений и мобильные запасы дикорастущей травянистой растительности.

Здесь следует обратить особое внимание на зоны, охватывающие степные и лесостепные районы Сибири, Центрального и Сев. Казахстана, которые сейчас превращаются во вторую житницу СССР.

Вслед за успешными посевами озимой пшеницы оказалось, что в степной зоне Сибири, несмотря на значительно более сильные морозы, нежели в степных районах европейской части СССР, могут хорошо выдерживать зимовку даже такие по своей природе маломорозостойкие растения, как яровые, которые не переносят зимовки в степной части СССР. «Внедрение культуры озимой пшеницы на поля колхозов и совхозов степных и лесостепных районов Сибири, Центрального и Северного Казахстана — дело весьма важное» (Т. П. Лысенко).

Для восточных районов страны с небольшим запасом леса все сказанное о расширении посевов озимой пшеницы, с точки зрения расширения энергетической базы сельского хозяйства на основе

своей собственной энергетической базы.



Фиг. 4. Карта-схема зонального распределения растительных отходов на территории СССР.

Годовой баланс растительных отходов по зонам

№ зоны	Классы отходов	Ориентировочная площадь зоны в тыс. км	Ежегодное количество растительных отходов в млн. т	
			Запасы отходов культурных растений	Мобильные запасы дикорастущей травяной растительности
1	I, II, III	331,2	75,0	2,127
2	I, II, III, IV	111,6	4,0	1,867
3	I, II, III, IV	100,8	4,2	1,70
4	I, III, IV	594,0	13,5	4,0
5	I, III, IV	313,2	9,6	2,9
6	I, III, IV	370,8	9,5	2,5
7	I, III, IV	468,0	1,07	0,77
8	I, III, IV	1060,8	25,2	6,0
9	I, III, IV	453,6	10,5	3,38
10	I, II, III, IV	316,8	7,5	3,0
11	I, III, IV	540,0	11,4	3,88
12	I, IV	345,6	7,8	2,58
13	I, III, IV	230,4	6,3	2,82
14	III, IV	572,4	13,5	4,42
15	I, II, IV	507,6	11,4	3,5
16	I, II, III, IV	172,8	3,8	0,72
17	I, IV	1000,0 ¹	—	19,0
18	I, IV	1000,0 ¹	—	21,0
Итого . . .		8490,6	146,87	86,184

¹ Доступные для сбора.

использования растительных отходов, является вопросом большой хозяйственной важности.

Приводимый ниже расчет баланса растительных отходов составлен на основании обследований, произведенных автором в различных районах СССР, а также на основании других литературных источников [12, 18]. Особое место в балансе растительных отходов принадлежит соломе, учитывая многообразные направления ее использования в сельском хозяйстве. Это обстоятельство обязывало подойти к расчету баланса по соломе с особой тщательностью.

Результаты исследования баланса соломы в сельском хозяйстве СССР позволяют прийти к следующим выводам:

1) Степень использования соломы в сельском хозяйстве СССР на покрытие собственных первоочередных нужд различна в отдельных зонах, однако имеющиеся излишки представляют громадный топливный резерв, использование которого для целей газификации создает реальные условия организации внутри сельского хозяйства своей собственной энергетической базы.

и
по
ее
вал
об
во
те
ра
си
ра
раз
СС
тур
рас
рай
тел
бен
хоз
ные
зов
ства
бал
отх
ден
вич
нист
дост
зань
дикс
З
стеш
стан
В
в сте
моро
хоро
моро
в сте
поля
Цент
(Т. I
Д
все с
ния р

энергетической базы сельского хозяйства на основе

2) Потребление соломы и ее баланс зависят от специализации сельского хозяйства зоны или района, плотности населения и близости транспортных путей.

3) Если по ряду зон или районов ощущается дефицит по соломе, все же первоочередные потребности сельского хозяйства в сырье для газификации могут быть в большинстве районов покрыты за счет рационального использования ряда дикорастущих травянистых растений (камыш, тростник, полынь), мобильные запасы которых достаточно велики.

В количественном выражении активная часть баланса растительных отходов на 1950 г. согласно натурному обследованию и расчетам складывается из следующих ежегодно возобновляемых ресурсов:

Отходы зерновых культур	132,06 млн. т.
Отходы технических культур	14,81 » »
Итого	146,87 млн. т.

Мобильные запасы дикорастущих растений (камыш, тростник, полынь)	86,947 млн. т.
Всего	233,034 млн. т.

Принимая в среднем низшую теплотворную способность растительных отходов в 2800 ккал/кг, получим запас растительных отходов применительно к контрольным цифрам сева на 1950 г. равным 51,73 млн. т условного топлива.

Дифференцированный баланс растительных отходов культурных растений, учитывающий направления их использования на нужды самого сельского хозяйства и потребление населением на 1950 г. в млн. тонн условного топлива, может быть представлен в следующем виде:

Животноводство	10,0 (59%)
Бытовое топливо	1,55 (9%)
Прочие хозяйственные нужды, включая саманное строительство	0,50 (3%)
Энергоиспользование	4,95 (29%)
	17,0 (100%)

Структура общего перспективного сводного баланса растительных отходов в сельском хозяйстве СССР на 1950 г. с учетом мобильных запасов дикорастущих растений будет следующая:

Животноводство	10,0 (19%)
Бытовое топливо	1,55 (3%)
Прочие хозяйственные нужды	0,5 (1%)
Энергоиспользование	29,68 (77%)
	51,73 (100%)

В соответствии с принятым нами зональным делением приводим в табл. 3 сводный баланс растительных отходов по зонам СССР на 1950 г.

Таблица 3
Сводный баланс растительных отходов по зонам СССР на 1950 г.

№ зон	Располагаемое абсолютное количество растительных отходов в млн. т			Количество отходов, возможное для энергоиспользования, в млн. т				Всего млн. т условного топлива
	отходы культурных растений	дикорастущие	Всего	Отходы культурных растений		Дикорастущие		
				абсолютное кол-во	условного топлива	абсолютное кол-во	условного топлива	
1	7,5	2,127	9,627	2,18	0,87	2,127	0,85	1,72
2	4,0	1,867	5,867	1,16	0,46	1,867	0,75	1,21
3	4,2	1,7	5,9	1,22	0,49	1,7	0,65	1,14
4	13,5	4,0	17,5	4,0	1,6	4,0	1,6	3,2
5	9,6	2,9	12,5	2,9	1,16	2,9	1,16	2,32
6	9,5	2,5	12,0	2,8	1,12	2,5	1,0	2,12
7	1,07	0,77	1,84	0,3	0,12	0,77	0,31	0,43
8	25,3	2,783	28,083	7,4	3,0	6,0	2,4	5,4
9	10,5	3,38	13,88	2,9	1,16	3,38	1,35	2,51
10	7,5	3,0	10,5	2,2	0,88	3,0	1,2	2,08
11	11,4	3,88	15,28	3,3	1,32	3,88	1,55	2,84
12	7,8	2,58	10,38	2,3	0,92	2,58	1,03	1,95
13	6,3	2,82	9,12	1,9	0,7	2,82	1,13	1,83
14	13,5	4,42	17,92	3,9	1,46	4,42	1,77	3,23
15	11,4	3,5	14,9	3,3	1,32	3,5	1,5	2,82
16	3,8	0,72	4,52	1,16	0,42	0,72	0,28	0,7
17	—	19,0	19,0	—	—	19,0	7,8	7,8
18	—	21,0	21,0	—	—	21,0	8,4	8,4
Всего	146,87	86,947	233,034	42,92	17,0 (23%)	86,164	34,73 (67%)	51,7 (100%)

Приведенный баланс показывает, что только за счет свободной части отходов культурных растений сельское хозяйство сможет обеспечить в 1950 г. работу 858 тыс. газомоторных установок мощностью по 25 л. с., а с мобильными запасами ежегодно возобновляемых дикорастущих растений — 2680 тыс. газомоторных установок.

На основании всего изложенного можно прийти к следующим выводам:

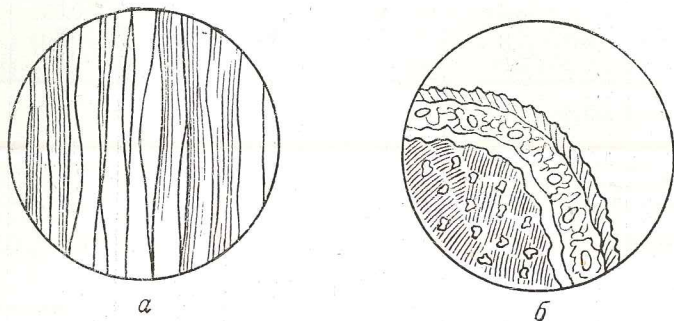
1) Растительные отходы в сельском хозяйстве представляют мощную базу газификации для получения моторного газа, базу, которая может служить реальным основанием для планирования и развития самостоятельной сети низовой энергетики с газовыми двигателями.

2) Ежегодная возобновляемость этой сырьевой базы определяет устойчивость созданной на ее основе энергетической системы, что является важнейшей ее хозяйственно-экономической особенностью.

3. БИОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И ОБЩИЕ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РАСТИТЕЛЬНЫХ ОТХОДОВ

Хлебные злаки

Солома является отходом хлебных злаков, представляющих исключительно многообразную группу полевых культурных растений, включающих восемь различных ботанических рядов. По морфологическим и биологическим признакам различают две группы хлебных злаков; в первую из них входят: пшеница, рожь, ячмень и овес, которые в предложенной нами классификации отнесены к I классу.



Фиг. 5. Стебель соломы:

а — разрез вдоль волокон стенки стебля соломы, б — поперечный разрез стенки стебля.

По мере прохождения фаз созревания или спелости хлебов, начиная от молочной до полной спелости, стебель злака постепенно меняет свою окраску от зеленой до полного пожелтения и затвердевания зерна. При этом влажность зерна устанавливается в пределах 14—16%, а влажность (относительная) стебля — в пределах 9—11%. Влагосодержание стенок стебля к этому времени обычно несколько выше к корневой части и ниже к колосу. На поперечном разрезе стебля ржи-соломины под эпидермисом расположено механическое кольцо из толстостенных белых лубяных волокон, плотно соединенных между собою. Местами в механическое кольцо вкраплены небольшие проводящие пучки с обращенным к эпидермису участком флоэмы, двумя крупными пористыми и мелкими спиральными или кольцевыми сосудами (фиг. 5).

За механическим кольцом идет пояс основной ткани, состоящий из крупных почти пустых паренхимных клеток. Этот пояс окружает большую центральную полость стебля, клетки, граничащие с полостью, сплюснуты и покрыты кутикулярным слоем. В основной ткани довольно правильно размещены проводящие пучки, окруженные каждый тонким механическим кольцом и тождественные по своему составу с проводящими пучками кукурузы. Стебель злака (солома) старея, сильно деревенеет, долее других не деревенеют хлорофиллоносные клетки под эпидермисом.

Солома, как и древесина, относится к растительному топливу состава углерод—водород—кислород, а по химическому составу представляет комплекс из клетчатки лигнина и гемицеллюлозы.

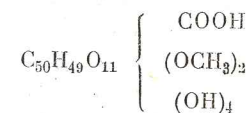
Основной частью соломы являются целлюлоза ($C_6H_{10}O_5$), окись кремния (SiO_2) и вода (H_2O). Вопрос о структурной формуле целлюлозы еще нельзя считать окончательно решенным, однако известно, что она, будучи весьма стойкой по отношению к действию различных химических агентов, в отмершем растении легко подвергается действию разнообразных микроорганизмов, превращающих ее в двуокись углерода, воду, метан и простейшие растворимые в воде органические кислоты.

Из инкрустирующих компонентов, входящих в состав соломы, следует упомянуть о лигнине, изученном еще в меньшей степени, чем целлюлоза. Некоторое представление о составе лигнина дают сравнительные данные состава целлюлозы и лигнина, приведенные в табл. 4, и формула лигнина из пушицы:

Химический состав целлюлозы и лигнина

Таблица 4

Элементы	Целлюлоза %	Лигнин %
Углерод	44,4	54—58
Водород	6,2	5,8—6,3
Кислород	49,4	35—39



Приведенная формула показывает сложность строения лигнина и естественность тех затруднений, которые сопровождают его выделение.

Состав органической массы соломы можно считать примерно одинаковым для различных видов хлебных злаков. Более заметны отклонения в количестве минерального остатка. В табл. 5 приведен сравнительный элементарный состав абсолютно сухой соломы для различных хлебных злаков первой группы:

Таблица 5

Сравнительный элементарный состав соломы хлебных злаков

Наименование растений	Основные компоненты элементарного состава			
	C	H	N	Ac
Пшеница озимая	46,1	5,6	0,42	4,1
Пшеница яровая	45,8	5,6	0,51	4,9
Рожь	45,8	5,7	0,52	3,5
Овес	44,38	5,18	0,45	7,2
Ячмень	42,7	5,28	0,90	6,5

Ниже мы приводим данные элементарного анализа соломы озимой пшеницы Кингисеппского района Ленинградской обл. урожая 1947 г. Анализ произведен в лаборатории топлива Центрального Котлотурбинного института и является по существу нормальной средней пробой для соломы этой зоны.

Рабочая масса	
Низшая теплотворная способность рабочего топлива Q_p	3842 ккал/кг
Содержание влаги W_p	8,93%
Содержание золы A_p	3,54%
Сера летучая S_p^{cm}	0
Углерод C_p	43,72%
Кислород и азот (O_p+N_p)	50,67%

Сухая масса	
Высшая теплотворная способность сухого топлива Q_c^B	4602 ккал/кг
Содержание золы A_c	3,89%

Горючая масса	
Высшая теплотворная способность горючей массы топлива Q_r^B	4789 ккал/кг
Содержание углерода C_r	49,95%
Содержание водорода H_r	6,29%
Сера летучая $S_r^{лет}$	0,12 %
Кислород и азот (O_r+N_r)	43,64%

Приведенные в табл. 6 данные технического и элементарного анализа для соломы пшеницы УССР несколько отличаются от северной соломы. Наряду с более высоким значением низшей теплотворной способности рабочего топлива, эта солома обладает и более высокой зольностью.

Состав золы соломы юга

Таблица 6

Место произрастания	C	H	O	N	W_p	A_c	S_c^c	Q_p^H
Харьковская область	50,0	7,7	44,4	0,7	8,8	5,7	0,09	4110
	52,8	7,9	44,4	0,77	7,1	5,7	0,08	3799
Сумская область	54,1	7,16	47,1	0,69	7,2	6,1	0,10	4280

Интересен по своим результатам анализ ржаной озимой соломы ниже среднего урожая с засоренных участков с подзолистой почвой (Ленинградская обл. 1938 г.).

W_p — влага общая, по рабочему топливу	10,50%
A_c — зола, к сухой массе	4,70%
S_c^{ob} — сера общая, к сухой массе	0,10%
C_r — содержание углерода, по горючей массе	50,50%
H_r — содержание водорода, по горючей массе	6,20%
S_r^k — сера колчеданная	0,10%

S_p^{op} — сера органическая	0,10%
N — азот	0,70%
O — кислород	43,20%
$Q_{6,r}$ — тепловыделение в бомбе на горючую массу	4750 ккал/кг
Q_r^B — высшая теплотворная способность	4740 ккал/кг
V_r — содержание летучих веществ без влаги	80,00%
Характеристика кокса	зернистый

$Q_{6,c}$ — тепловыделение в бомбе на сухую массу	4530 ккал/кг
A_p — зола рабочего топлива	4,20%
S_p^{ob} — сера общая на рабочее топливо	0,10%
Q_p^H — низшая теплотворная способность рабочей массы	3690 ккал/кг

Температура плавления золы

T_1 — начало деформации	450° C
T_2 — температура размягчения	750° C
T_3 — температура жидкоплавкого состояния	1000° C

Рассмотрение данных приведенного анализа обращает внимание на некоторое снижение значения низшей теплотворной способности рабочего топлива и повышение зольности для соломы с примесью сорняка.

По исследованиям, проведенным А. Н. Блаженовой в Московском Коммерческом институте, в период сбора урожая ржаная солома содержала воды 8,98%, золы 3,90% и обладала высшей теплотворной способностью на воздушно сухое вещество 4135 ккал/кг, а на органическую массу 4746 ккал/кг; солома овса имела 6,94% воды и 4,59% золы при высшей теплотворной способности на воздушно сухое вещество 4165 ккал/кг и на органическое вещество 4708 ккал/кг.

Анализ ржаной мякоти показал содержание воды 9,29%, золы 15,02% и высшую теплотворную способность на воздушно сухое вещество 3682 ккал/кг и на органическое вещество 4862 ккал/кг.

Анализ овсяной мякоти обнаружил содержание воды 7,92%, золы 15,13% и высшую теплотворную способность на воздушно сухое вещество 3976 ккал/кг и на органическое вещество 5168 ккал/кг.

Приводим для сопоставления данные по рисовой мякоти и майсовой соломе.

Таблица 7

Состав рисовой мякоти и майсовой соломы

Вид соломы и мякоти	Содержание летучих веществ	Зола	Химически связанный углерод	Сырая смола	Комбинированная влага	Сера	Низшая теплотворная способность ккал/кг
Рисовая мякоть	80,9	7,0	12,1	17,2	8,5	—	3000
Майсовая солома	80,9	2,1	—	19,2	—	0,10	2880

Зола соломы светлосерого цвета, взятая из зольника газогенератора, дает остаток от прокалывания от 1 до 7% в зависимости от хода генераторного процесса и управления им. Зола соломы может быть отнесена к золе легкоплавкой в диапазоне температур (в зависимости от зоны произрастания) от 950 до 1100° С. (проф. Кириш к легкоплавкой золе относит золы с температурой плавления ниже 1200° С). Эти температуры подтверждаются составом минеральной части топлива. Анализ золы озимой пшеницы, произведенный автором в Харькове в 1938 г., дал следующие результаты:

SiO ₂	68,72	Fe ₂ O ₃	4,07
CaO	7,9	MgO	2,98
Al ₂ O ₃	5,03	MnO	0,32

Молекулярные соотношения для золы этого состава оценивают эту золу как легкоплавкую

$$\frac{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO}} = 5,2; \quad \frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2} = 0,08.$$

Приведем состав золы соломы по данным второго анализа:

SiO ₂	43,95%	SO ₃	1,45
Al ₂ O ₃	32,05	P ₂ O ₅	1,60
Fe ₂ O ₃	8,45	Щелочи	3,14
CaO	6,00	Прочие	1,29
MgO	2,07		

Молекулярные соотношения:

$$\frac{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO}} = 4,5; \quad \frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2} = 0,19.$$

Определение температуры плавления золы соломы озимой пшеницы, проведенное в вертикальной подвижной электрической печи Геруса, дало следующие результаты:

	T ₁	T ₂	T ₃
Сумская обл.	550	750	950—1000
Харьковская обл.	640	720	900
Ленинградская обл.	450	750	1000

Опыты, произведенные с плавкостью золы соломы автором в 1939 г. на ХТЗ, показали, что промывка соломы и освобождение ее от песка и пыли повышают точку плавления золы на 80—100°. Шлак, получающийся в результате оплавления золы соломы, бывает двух видов: губчатый с малой механической прочностью и «литой» полупрозрачный высокопрочный, часто крепко сцепляющийся с металлическими поверхностями камеры газификации и колосниковой решетки газогенератора.

К физическим свойствам соломы, имеющим наибольшее значение в процессе газификации, относятся удельный вес и влажность. При

определении удельного веса соломы мы будем различать абсолютный удельный вес, или вес вещества соломы, и объемный — насыпной вес соломы, взятой в естественном виде. Ниже мы приводим значения среднего абсолютного удельного веса вещества стебля соломы.

Таблица 8
Средний абсолютный удельный вес соломы

Вид соломы	Вес твердых составных частей	Вес с содержанием 6% влаги
Солома ржи	1,65	1,04
Солома озимой пшеницы	1,67	0,96
Солома яровой пшеницы	1,67	0,98
Солома овса	1,68	0,81
Солома ячменя	1,68	0,83
Просо	1,69	0,94
Гречиха	1,69	1,06
Лен	1,69	1,08

Таблица 9
Средние значения насыпного веса соломы при влажности 8—10%

Тип соломы	Вес 1 м ³ в кг
Солома комбайновой уборки	17,0
Сечка 10—15 мм	65—70
Резка 40—50 мм	40—45
Прессованное топливо с коэф. уплотнения 3,5	55—60

Важными физическими характеристиками соломы, помимо удельного веса, плотности, агрегатного состояния и пр., являются три тепловых величины: температуропроводность *a*, теплопроводность *λ* и теплоемкость *C*.

Зависимость между этими величинами следующая:

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \gamma} \text{ м}^2/\text{час},$$

где *γ* — удельный вес, а *λ* — коэффициент теплопроводности. Значение *λ* для соломы лежит в пределах 0,050—0,075 ккал. м²час°С.

Упомянутые величины имеют большое значение при изучении газификационных характеристик соломы и, особенно, ее подсушки как в газогенераторе, так и при различных способах ее естественной и искусственной сушки.

Как мы уже отмечали выше, влажность соломы в большой степени зависит от времени года и влажности окружающего воздуха. В период жатвы хлеба относительная влажность стебля соломы на юге доходит до 9—11%, а иногда снижается до 5%. К осени влажность соломы повышается и доходит до 25—35%, в зимние месяцы она несколько снижается и повышается вновь к весне. Вода, заполняющая полость клеток и межклеточные пространства соломы, находится в капельно-жидком состоянии и при самом незначительном повышении температуры окружающего воздуха из них легко выделяется. Вода, находящаяся в стенках клеток, так называемая гигроскопическая влага, находится в коллоидально связанном с тканью соломы состоянии и ее частичное удаление из клеток возможно лишь

в результате искусственного высушивания при температуре выше 100°C . Распределение воды по толщине стенки стебля соломы весьма неравномерно, однако малая толщина стенки ($0,75-0,35\text{ мм}$) мало сказывается на разнице в процессе отдачи влаги наружной поверхности стебля и внутрилежащими слоями.

При хранении под навесом влажность воздушно сухой соломы можно принять в $15-20\%$. Происходящее при сушке соломы (особенно это заметно на сечке) сокращение объема имеет важное значение. Опытом на сушилах установлено, что уменьшение содержания влаги на 20% сопровождается сокращением объема на $11-12\%$.

Таблица 10

Сравнительные данные по удельному весу и теплотворной способности некоторых твердых топлив

Наименование топлива	Удельный вес	Низшая теплотворная способность ккал/кг
Чурки древесные	0,61	3535
Натуральный брикет из соломы	1,15	3866
Термически обработанный брикет из соломы	1,0	4988
Торфяной брикет	0,9	2860
Брикет из антрацита	1,5	6770

удельный вес и теплотворную способность соломы, что видно из табл. 10. Однако реакционная поверхность ее остается примерно равной древесным газогенераторным чуркам. Зольность брикета из соломы достигает 20% , главным образом, за счет засоренности соломенной сечки, идущей на приготовление брикета, различными минеральными примесями (пыль, песок и пр.).

Исследование брикета, изготовленного при давлении до 700 кг/см^2 , на механическую прочность, показало, что разрушающее усилие поперек волокон составляет $320-370\text{ кг/см}^2$, а вдоль волокон $75-85\text{ кг/см}^2$. Брикет, полученные при более высокой температуре ($200-250^{\circ}\text{C}$) и при величине удельного давления до 300 кг/см^2 , обладали следующей механической прочностью: разрушающее усилие поперек волокон $80-120\text{ кг/см}^2$, вдоль волокон $40-60\text{ кг/см}^2$ при их удельном весе $0,95-1,1$.

Одним из существенных недостатков брикета из соломы, усложняющих его применение в газогенераторах, является его нестойкость в воде и паре. В воде брикет совершенно разрушается, а в среде, содержащей пары воды, брикет начинает увеличиваться в объеме — разбухать.

В бункере работающего газогенератора, в зонах подготовки топлива, как раз и обнаруживается склонность брикета к разбуханию, приводящая к заклиниванию слоя, его зависанию и накоплению мелочи, затрудняющей ведение нормального генераторного процесса.

Лен

Лен является однолетним растением с прямым стеблем, достигающим нормально 1 м высоты. Известны и более низкорослые формы, но есть и карликовые около $15-20\text{ см}$ высотой.

На фиг. 6 мы приводим анатомическое строение стебля льна. Наружную поверхность стебля составляет эпидермис (кожица), состоящий из одного ряда клеток с утолщенными стенками, покрытыми тонким налетом воска. Под эпидермисом помещается кора, в которой кольцом располагаются волокнистые пучки луба. За кольцом волокнистых пучков находятся ситовидные трубки с клетками — спутницами, соприкасающимися с камбиальным кольцом, под которым к внутренней части стебля расположена древесина с сосудами. Центральная часть стебля занята сердцевинной тканью, а в самом центре стебля имеется полость.

Волокнистые пучки распложены кольцеобразно на некоторой глубине стебля, имеют, как это видно на фиг. 6, различные очертания и состоят из волокон, плотно или рыхло распложенных в пучке. Пучки состоят из элементарных волокон, склеенных между собою нектинным веществом. Каждое волокно является сильно вытянутой клеткой с утончающимися концами. Первоначально эти клетки имеют округлую форму и заполнены протоплазматическим содержанием. Затем, по мере роста соответствующей зоны стебля в длину, они удлиняются, стенки их утолщаются с внутренней стороны, протоплазма ссыхается и пристает к стенкам, а вместо нее в середине волоконца образуется полость. Количество волокна очень невелико у самого основания стебля, составляя здесь всего около 2% веса соответствующей части стебля, по направлению к середине стебля содержание волокна возрастает, доходя в средней части до 35% ; в верхней части процентное содержание его снова падает до $28-30\%$.

При механическом выделении волокна на мяльных и трепальных машинах из стебля получается отход из одеревеневших частей стебля, называемый кострой.

Костра составляет $65-70\%$ веса лубяного стебля и в основном состоит из целлюлозы ($45-58\%$), лигнина ($21-29\%$) и пентозана ($23-26\%$).

Ниже приводим данные элементарного и технического анализа льняной костры:

W_p — влага общая по рабочему топливу	11,10%
A_c — зола по сухой массе	4,70%
S_c^0 — сера общая к сухой массе	0,10%
C_r — содержание углерода по горючей массе	51,00%
H_r — содержание водорода по горючей массе	6,10%

S_r^{K} — сера колчеданная по горючей массе	0,10%
S_r^{OP} — сера органическая по горючей массе	0,10%
N_2 — азот	0,70%
O_2 — кислород	42,80%
$Q_{6,r}$ — тепловыделение в бомбе на горючую массу	4880 ккал/кг
Q_r^B — высшая теплотворная способность	4885 ккал/кг
V_r — содержание летучих веществ без влаги	83,00%
Характеристика кокса	
$Q_{6,c}$ — тепловыделение в бомбе на сухую массу	4730 ккал/кг
A_p — зола рабочего топлива	2,80%
S_p^{ob} — сера обшая на рабочее топливо	0,10%
Q_p^H — низшая теплотворная способность рабочей массы	3850 ккал/кг

Температура плавления золы

T_1 — начало деформации	750° С
T_2 — температура размягчения	950° С
T_3 — температура жадкоплавного состояния	1000—1100° С

Конопля

Из двух самостоятельных видов только конопля обыкновенная имеет для СССР производственное значение как прядильная культура. Возделываемая на громадной территории СССР конопля обыкновенная имеет несколько типов, отличающихся морфологическими, физиологическими и хозяйственными особенностями (табл. 11).

Таблица 11

Характеристика типов конопли

Тип конопли	Продолжительность вегетационного периода, дней	Высота стебля см	Другие особенности
Северная конопля . . .	80—90	20—60	Мелкий плод, малооблиственный стебель
Среднерусская конопля .	90—110	125—150	Тонкий неветвистый стебель
Южнорусская конопля .	100—120	130—175	Четырех-шестигранный с полостью стебель
Кавказская конопля . .	120—130	250—300	
Моздокская конопля . .	120—125	200—300	Ветвистый стебель с небольшой полостью. Некрупный лист.

В молодом возрасте внутренняя часть стебля конопли обычно заполнена сердцевинной. Ко времени цветения сердцевина постепенно высыхает, развивается в центре и прилегает с внутренней стороны к стенке древесины стебля, внутри которого, таким образом, образуется полость.

На фиг. 7 приведен поперечный разрез молодого стебля конопли. Центральную его часть, около 50% всего диаметра, составляет

сердцевина, от которой отходят сердцевинные лучи. Вокруг сердцевины располагаются более темные круги древесины и сосудистых пучков, отличающихся неравномерностью размеров сосудов. Этой различной величиной сосудов конопляный стебель анатомически хорошо отличается от льняного. Снаружи от древесины за камбиальным слоем располагается лубяная часть стебля, составленная толстостенными клетками, представляющими лубяные волокна, соединенные в лубяные пучки.

Строение конопляного стебля, таким образом, в основном напоминает строение стебля льна, а лубяные волокна обеих прядильных культур чрезвычайно схожи между собой. Однако, в отличие от льна, кроме пучка первичных лубяных пучков у конопли, за счет деятельности камбия, образуется новое внутреннее кольцо вторичных лубяных пучков, следом за которым может образоваться третье и четвертое кольцо.

Прядильные волокна конопли, расположенные недалеко от поверхности в перидикле, составляют 20—26% от веса всего стебля. Таким образом, примерно $\frac{3}{4}$ веса стеблей конопли может быть использовано как топливный и подсобно-строительный материал. Теплотворная способность (низшая) отходов конопли при относительной влажности 8,5% составляет 3620 ккал/кг, зольность 7%.

Кукуруза

Кукуруза является представителем второй группы хлебных злаков. Стебель кукурузы прямой, мощный, от 60 см до 5 м высотой, иногда кустится и образует надземные разветвления. Внутри стебель заполнен рыхлой сердцевинной. В нижних надземных узлах стебля образуются опорные корни иногда на высоте до 50 см над землей, причем корни эти развиваются наиболее сильно у поздних сортов и у сортов с крупными высокими стеблями, более других нуждающихся в опоре.

Листья с широкой пластинкой в количестве от 8 до 45 на одном растении. Початки бывают различной величины и формы, чаще всего цилиндрической или слабо конусовидной, покрытые снаружи особой оберткой, состоящей из нескольких слоев видоизмененных листьев кукурузы.

На фиг. 8 изображена схема поперечного разреза стебля кукурузы при слабом увеличении. Здесь виден эпидермис с кутикулой, основная ткань или паренхима стебля, состоящая из крупных тонкостенных, наполненных клеточным соком клеток, механическое кольцо из лубяных волокон и проводящие или сосудисто-волокнистые пучки. Вокруг каждого пучка находится механическая ткань, состоящая из толстостенных волокон. В пучке находятся два больших пористых сосуда и между ними книзу еще два меньших, кольчатый и спиральный, воздушная полость ниже сосудов, ситовидные трубки пустые с белыми блестящими оболочками и сопровождающие их клетки, мелкие с темным содержимым. Описанные проводящие пучки, как это видно на фиг. 8, разбросаны среди основной ткани. В пучках сосуды всех величин и типов являются ложем

водного тока, идущего от корней к листьям, или, как говорят, восходящего тока; ситовидные трубки являются местом тока пластических веществ.

После созревания кукурузные початки собираются для освобождения из них зерна, а стебель с корневищем и засохшими листьями остается в поле. Сбор их дает возможность превратить эти отходы в ценное топливо. Низшая теплотворная способность кукурузы составляет 3270 ккал/кг. Зольность от 4 до 10% и зависит главным образом от состава почвы, на которой произрастает кукуруза (табл. 12).

Таблица 12

Характеристика горючей массы балласта (в %) и теплотворной способности кукурузного кочана

C_T	H_T	O_T	N_T	A_c	W_p	Q^B ккал/кг	Q^H ккал/кг
48,7	6,1	45,0	0,2	1,9	19,0	4260	3270

Подсолнечник

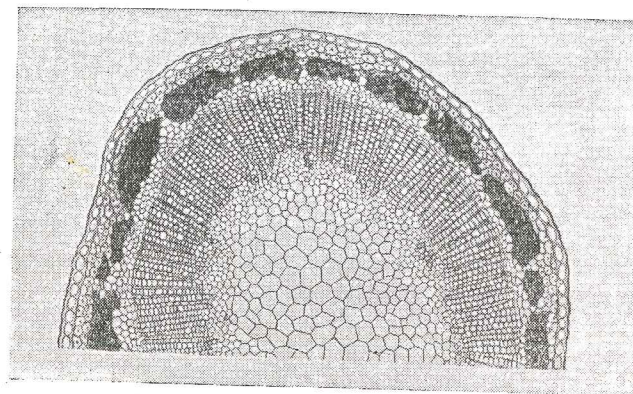
Подсолнечник относится к семейству сложноцветных, являясь одним из распространенных представителей группы масличных растений. Основными частями растения являются: стебель, листья и соцветие, называемое корзинкой.

Подсолнечник является однолетним растением с плотным стеблем высотой 150—400 см. Соцветие — крупная корзинка, диаметр которой у культурных форм достигает 45 см. Подсолнечник обладает мощной корневой системой, идущей вглубь до 150 см. Семена содержат около 28—30% жира, а ядро без лузги до 50—60%. При переработке подсолнечника получается масло, жмых и лузга. Зола лузги и стеблей, богатая по содержанию калием, идет в качестве удобрения и применяется для выработки поташа. Наличие растительной массы в подсолнечнике различно в зависимости от его вида. Наиболее характерные особенности отдельных видов подсолнечника приведены в табл. 13.

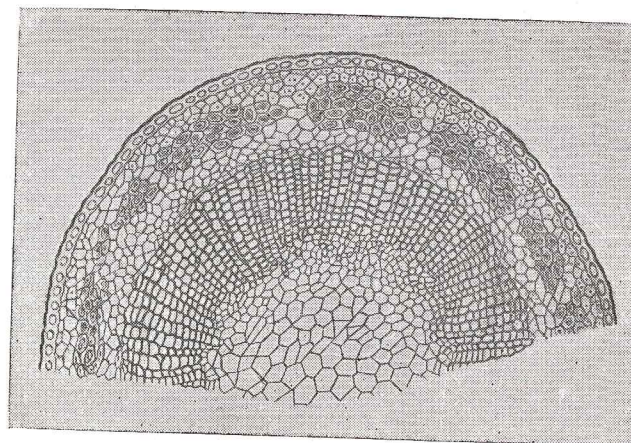
Таблица 13

Характеристика типов подсолнечника

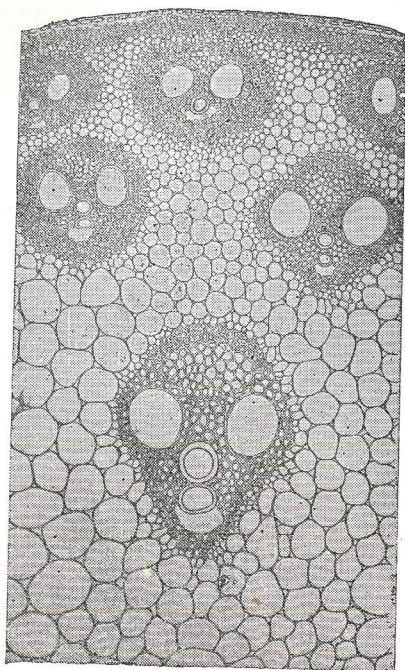
Признаки	Грызовый подсолнечник	Масличный подсолнечник	Межеумок
Высота стебля	2—4 м	1,5—2,5 м	2—3 м
Толщина стебля	толстый	тонкий	толстый
Ветвистость	маловетвистый	более ветвистый	маловетвистый
Величина листьев	крупные	мелкие	крупные
Диаметр корзинки	17—45 см	14—20 см	15—30 см
Длина семечка	11—23 мм	7—13 мм	11—15 мм
Ширина семечка	7,5—12 мм	4—7 мм	7,5—10 мм
Толщина кожуры	толстая	тонкая	толстая
Процент лузги	46—56	40—43	48—52



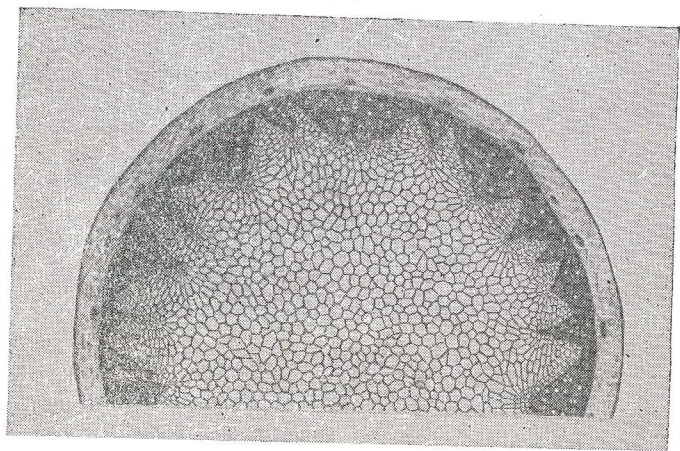
Фиг. 6. Поперечный разрез части стебля льна.



Фиг. 7. Поперечный разрез части молодого стебля конопли.



Фиг. 8. Поперечный разрез части стебля кукурузы.



Фиг. 9. Поперечный разрез кожуры семянки подсолнечника.

Как уже отмечалось при характеристике трех основных групп подсолнечника, одним из важных хозяйственных отличий между ними является содержание в семечках оболочки или лузги. Лузжистость семян колеблется по сортам и группам в довольно больших пределах от 40 до 60%. Средняя длина лузги 11—23 мм, ширина 7,5—12 мм. На фиг. 9 мы приводим разрез кожуры семянки подсолнечника. На микроскопическом препарате кожуры у панцирных семян можно различить следующие последовательные слои клеток. Самый наружный сравнительно тонкий слой является эпидермисом. Под эпидермисом располагается несколько рядов клеток пробковой ткани; под ней — черный панцирный слой клеток и, наконец, еще глубже под панцирным слоем находятся толстостенные клетки склеренхимы.

Основным веществом лузги является клетчатка и пентозаны, ее высшая теплотворная способность при влажности 7,11% на воздушно сухое вещество равна 4883 ккал/кг и на органическую массу 4440 ккал/кг при зольности 1,96%.

В табл. 14 приводим химический состав лузги в процентах на сухое вещество.

Химический состав лузги

Таблица 14

Пробы	Эфирный экстракт	Белок	Клетчатка	Углеводы (без азотистого экстрактивного вещества)	Зола
1	0,50	3,61	52,85	40,59	2,10
2	5,67	5,66	60,38	26,28	1,78
3	1,00	1,33	61,54	31,20	1,93
0	—	3,06	63,68	—	1,99

Сумма клетчатки (горючего вещества) и безазотистых экстрактивных веществ составляет в лузге от 70 до 91%. Панцирный слой лузги состоит из так называемого фитомелана, содержание которого колеблется от 1,3 до 5%.

Приведем исследования химического состава листостебельной массы и корзинок различных разновидностей подсолнуха (табл. 15).

Химический состав золы различных органов подсолнечника и растения в целом различен, что видно из табл. 16.

Зола подсолнечной лузги относится к зоне средней плавкости: температура ее деформации 1000°, размягчения 1200°, температура жидкоплавкого состояния 1320°.

Несмотря на высокие теплотехнические свойства, лузга, как энергетическое топливо, мало изучена. В статье инж. Ионина (журнал «Тепло и сила» № 10, 1927 г.) для лузги приводятся следующие данные:

1. Состав воздушно сухой лузги: беззольного нелетучего углерода 17,0%, летучих веществ (бохумский метод) 71,69%, гигроскопической воды 9,50%, золы при 650° С 1,81%.

2. Высшая теплотворная способность $Q_p^B = 4340$ ккал/кг.

Химический состав подсолнечника (на сухой вес) Таблица 15

Название разновидностей	Сырой белок	Эфирный экстракт	Углеводы	Клетчатка	Зола
Стебли с листьями					
Чешский	6,32	2,23	38,34	46,48	6,63
Полосатый	5,61	1,17	34,88	50,18	8,16
Белый	6,96	1,42	38,89	45,78	6,99
Цветущие шляпки					
Чешский	12,78	11,14	45,91	23,98	6,19
Полосатый	14,70	14,94	38,31	24,29	7,76
Белый	14,98	12,78	42,20	27,04	6,00

Химический состав золы подсолнечника Таблица 16

Элементы	Стебли	Шляпки	Целое растение
K ₂ O	63,78	45,88	53,06
Na ₂ O	—	—	0,02
CaO	7,50	16,66	14,57
MgO	7,85	6,61	7,52
Fe ₂ O ₃	0,04	0,23	0,13
P ₂ O ₅	6,0	17,41	6,84
SO ₃	2,72	5,12	4,08
CL ₂	11,23	7,16	10,47
SiO ₃	6,88	0,93	3,31

Данные анализа лузги Таблица 17

Название элементов	По данным Теплотехнического института					
	Проба № 1		Проба № 2		Проба № 3	
	Рабочее топливо	Горючая масса	Рабочее топливо	Горючая масса	Рабочее топливо	Горючая масса
Углерод	45,37	51,10	41,01	50,76	41,82	50,0
Водород	5,20	5,86	4,73	5,86	5,01	6,0
Кислород с азотом	38,10	43,04	34,98	43,38	36,80	44,0
Сера	0,12	—	0,07	—	0,08	—
Влага	9,23	—	17,36	—	14,46	—
Зола	1,98	—	1,85	—	1,83	—
Теплотворная способность	4015	4585	3548	4521	3590	4400

3. Состав лузги, высушенной при 110° С: углерода 49,0%, водорода 5,75%, кислорода вместе с азотом 43,11%, серы 0,10%, золы — 2,00%.

В табл. 17 приводим анализ лузги по различным источникам. Как видно из табл. 17, лузга обладает постоянством состава органической массы. Таким образом ее теплотворная способность зависит почти исключительно от влажности. Зольность лузги может быть принята постоянной и равной 1,85%. Тогда уравнение, выражающее зависимость между теплотворной способностью лузги и ее влажностью, будет:

$$Q_{\text{раб.}} = Q_{\text{орг.}} \frac{100 - B}{100} \cdot 6W,$$

где $Q_{\text{раб.}}$ — теплотворная способность рабочего топлива;
 $Q_{\text{орг.}}$ — теплотворная способность органической массы;
 W_p — влажность в процентах.

Приведенное выше выражение для $Q_{\text{раб.}}$ после подстановки численных значений $Q_{\text{орг.}}$ и A (зольность) примет следующий вид:

$$Q_{\text{раб.}} = 4318 \cdot 6 - 50W.$$

Это выражение показывает, что между теплотворной способностью лузги и ее влажностью существует прямолинейная зависимость, изображенная на фиг. 10.

Насыпной вес подсолнечной лузги 130 кг/м³.

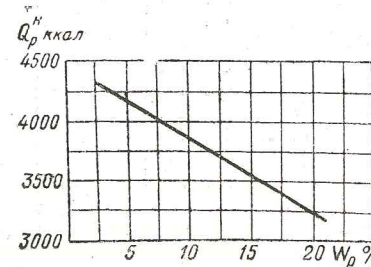
Хлопчатник

Хлопчатник является важнейшим прядильным растением и основным сырьем текстильной промышленности. Основным отходом хлопчатника является коробочка, открывающаяся тремя-пятью створками, и стебель. При первичной обработке хлопчатника (очистке сырца) отходит примешанный лист и мелкий сор. При использовании хлопкового семени в маслобойной промышленности получаемая при этом шелуха представляет собою также ценное топливо.

В СССР культивируется три вида хлопчатника: упланда, египетский и третий, наименее ценный и вытесненный в культуре — гуза.

Самую крупную коробочку имеет хлопок упланда; коробочка этого хлопка обладает 4—5 хорошо раскрывающимися створками.

Минеральный состав отдельных частей хлопчатника различен, что видно из табл. 18.



Фиг. 10. Зависимость теплотворной способности лузги от ее влажности.

Таблица 18

Минеральный состав частей хлопчатника

Название элементов	Коробочки		Листья		Стебли	
	на золу	на сухой вес	на золу	на сухой вес	на золу	на сухой вес
Зола	—	8,330	—	15,93	—	4,54
P ₂ O ₅	3,84	0,320	3,14	0,50	4,55	0,207
K ₂ O	41,15	3,428	8,03	1,279	28,83	1,309
Na ₂ O	0,62	0,052	1,97	0,314	2,42	0,110
CaO	12,66	1,055	38,56	6,143	20,80	0,994
MgO	3,39	0,282	7,00	1,115	9,04	0,410
SO ₃	5,89	0,491	4,13	0,658	2,76	0,125
Нерастворимый остаток	3,85	0,321	7,85	1,251	3,33	0,151

Зола хлопчатника относится к золе тугоплавкой. Это подтверждается ее составом, приводимым в табл. 19.

Таблица 19

Химический состав золы хлопчатника

	Сырая зола	Углекислота в % на сырую золу	Чистая зола	K ₂ O	N ₂ O	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅	SO ₃	SiO ₂	Cl
Стебли	2,33	22,40	1,81	14,70	17,27	32,24	5,67	4,84	14,12	2,12	5,93	3,11
Листья	9,27	15,20	7,86	16,60	9,00	34,32	0,94	3,18	13,18	5,02	7,26	10,47

По сравнению с золой соломы здесь необходимо отметить большую разницу в содержании SiO₂ (окиси кремния); если для хлопчатника его содержание в среднем можно принять в 6%, то для соломы оно равно 65%. Такое малое содержание SiO₂ в золе хлопчатника существенно сказывается на точках состояния золы хлопчатника, а именно температура деформации 750° и температура размягчения и жидкоплавкого состояния 1500°.

Исследование ветвей хлопчатника (гуза-паи) Узбекистана, проведенное лабораторией ВТИ, дает состав и свойства, приведенные в табл. 20.

Данные о теплотворной способности отдельных частей хлопчатника приведены в табл. 21.

В табл. 22 приведены данные по анализу американского хлопчатника.

В табл. 23 приведены данные анализа отдельных частей хлопчатника, проведенного проф. В. Р. Вильямсом по поручению Главного хлопкового комитета.

Результаты анализа ветвей хлопчатника

Таблица 20

Наименование	Обозначения	Результаты химического анализа (в %)	
		Проба № 1	Проба № 2
Вода	W ^P	13,41	14,43
Зола	A ^P	2,76	2,76
Сера общая	S ^P	0,06	0,05
Углерод	C ^P	40,50	40,86
Водород	H ^P	5,18	5,10
Азот	N ^P	0,51	0,45
Кислород (по разности)	Q ^P	37,58	36,35
Выход летучих	V ^P _л	65,89	64,35
Характеристика кокса		слипшийся	
Теплотворная способность высшая	Q ^P _в ккал/кг	3840	3913
Теплотворная способность низшая	Q ^P _н ккал/кг	3480	3551

Таблица 21

Теплотворная способность частей хлопчатника

Части растения	W %	A %	Высшая теплотворная способность	
			при данной влажности	органической массы
Чингалак (шелуха корбочек хлопчатника)	14,08	8,9	3837	4980
Хлопковые семена	9,28	4,13	5307	6140
Хлопковая лузга	14,39	2,12	4188	5020

Таблица 22

Химический состав американского хлопчатника

Содержан. летучих веществ %	Зола %	Химически связанный углерод	Сырая смола	Комбиниров. влага	Сера	Низшая теплотв. способность ккал/кг
Оболочка хлопка						
64,5	5,9	21,6	10,0	8,0	0,10	3620
Семенная коробочка						
74,5	3,0	22,8	12,7	12,2	0,32	4000

Характеристика семян и лузги хлопчатника

Наименование	Чингалак (шелуха корбочек)	Хлопковые семена	Хлопковая лузга		
Содержание влаги	14,08	9,28	13,22	15,37	14,59
Низшая теплотворная способность при данной влажности	3516	4906	3905	38,01	3733
На абсолютно сухое вещество:					
Зола	10,36	4,55	2,58	2,39	2,44
Серы	0,18	0,36	0,10	0,025	0,069
Углерода	43,06	54,39	49,56	45,63	46,35
Водорода	5,10	7,06	6,09	6,42	6,25
Кислорода	40,17	30,36	41,05	44,76	44,19
Азота	1,133	3,283	0,624	0,741	0,707

В период сбора хлопка стебли хлопчатника имеют относительную влажность не свыше 13—14%, однако после длительного хранения на открытом воздухе под навесом влажность повышается до 18—20%. Насыпной вес чингалака 160 кг/м³.

Камыш озерный

Озерный камыш обладает гладким, совершенно безлистным стеблем, несущим группу выходящих сбоку стебля у вершины бурых плотных колосков. На разрезе резко бросается характерное для растения, погруженного нижней частью в воду, разделение на узкую полоску плотной коры и обильную рыхлую переполненную воздушными ходами сердцевину. Среди клеток эпидермиса встречаются небольшие группы мелких лубяных волокон.

За эпидермисом следует плотный слой хлорофиллоносной паренхимы и слой, состоящий из сердцевины с хорошо выраженными проводящими пучками.

Внутренняя часть стебля заполнена воздухоносной сердцевиной, построенной в виде сети из многоугольных клеток, соединенных в правильные цепочки, сходящиеся узлами, в которых находятся проводящие пучки.

Низшая теплотворная способность камыша лежит в пределах 2900—3300 ккал/кг при зольности в 3—4%. Осенью стебли камыша окрашиваются в желто-коричневые цвета, а влажность их доходит до 30—35%.

Перезимовавший камыш (при хранении под навесом) снижает свою влажность до 20—25%. Невысокая гигроскопичность камыша позволяет ему сохранять влажность в течение года примерно в одних и тех же пределах. Брикетированный камыш имеет теплотворную

способность 3700 ккал/кг при влажности 6—7%, зольность 5% при количестве летучих до 80%.

Большие запасы озерного камыша в СССР позволяют рассматривать его как значительный ресурс в балансе местных твердых топлив.

Тростник

Тростник, подобно камышу, образует большие заросли в прибрежной полосе озер, рек и речных плесах, а также иногда покрывает значительные площади заболоченных участков в лесу и степных низинах.

Стебель тростника полый, со стеблевыми узлами, утончающийся кверху и заканчивающийся метелкой. Толщина стенки стебля в основании доходит до 12—15 мм. К концу вегетационного периода стебель желтеет с постепенным одревеснением от наружных к внутренним слоям. Высота стебля тростника достигает 2 м.

На разрезе стеблевого узла тростника видно широкое кольцо листового основания, сливающееся со стеблем в нижней части узла.

Лист тростника ланцетовидный, шириной у основания до 23 мм.

В общих чертах строение стебля тростника схоже со строением стебля хлебных злаков, однако здесь основная ткань и проводящие пучки более развиты, что ясно заметно по значительному утолщению стенок стебля тростника, доходящему у основания до 3—4 мм. Осенью тростник желтеет и в таком виде пригоден для сбора. К этому времени относительная влажность основной части стебля и листьев доходит до 17—18%. Влажность стебля у корневища выше и равна примерно 25—30%.

Низшая теплотворная способность тростника (включая лист) при влажности 15% составляет 3450—3650 ккал/кг, зольность от 3 до 7%, гигроскопичность тростника более низкая, чем у соломы хлебных злаков. Следует отметить устойчивость камыша против гниения.

Ниже приводится элементарный состав горючей части и балласта тростника.

Углерод	44,11 (45,90%)
Водород	5,33 (5,91%)
Азот	0,71 (0,98%)
Зола	3,30 (6,80%)

Разные растительные отходы

Среди других групп растительных отходов, представляющих значительный интерес как газогенераторное топливо, следует отметить: 1) отходы крупяного производства, 2) опавший лист, 3) кизяк, 4) отдубина.

Отходы крупяного производства

Отходы крупяного производства, представленные нашим вторым классом классификации растительных отходов, имеют мелкозернистое строение в виде чешуек, получаемых при пропуске зерна через крупнообдирочные машины. Низшая те-

плотворная способность этих отходов колеблется от 3500 до 4000 ккал/кг, зольность от 4 до 11%. Влажность отходов 8—13%, она сохраняется примерно в этих пределах долгое время при хранении под навесом.

О падший лист

Опадший лист древесины лиственных и хвойных пород также может быть использован в качестве газогенераторного топлива. Теплотворная способность опадшего листа при влажности в 12% в среднем может быть принята равной $Q_p^H = 3200 - 3300$ ккал/кг. Хорошие результаты при газификации дает их примесь к соломе и другим отходам. Листья имеют следующий состав органической массы: $C_o = 45,015\%$, $H_o = 6,971\%$, $O_o + N_o = 49,910\%$ при $A = 7,118\%$.

К и з я к

В средней полосе СССР, на юге и в Сибири большое распространение имеет кизяк, используемый в качестве бытового топлива. Опыт его газификации дал положительный результат. В табл. 24 мы приводим характеристику горючей массы кизяка, балласта и его теплотворную способность.

Таблица 24

Характеристика горючей массы кизяка

C_T	H_T	O_T	A_c	W_p	Q_p^H ккал/кг
48,4	6,0	45,6	20,0	25,9	2580

О т д у б и н а

Отдубина представляет собою кору древесины, использованную в технологическом процессе кожевенного производства.

После дубления кожи, без отжима воды и без сушки, отдубина имеет влажность до 70%, а зольность абсолютно сухого вещества до 2,5%. В таком состоянии низшая теплотворная способность отдубины как топлива не превышает 800 ккал/кг.

Если отдубину пропустить через валки для отжима жидкости, то влажность ее может быть понижена до 30—40%.

В отдельных случаях зольность отдубины может доходить до 15—16% на абсолютно сухое вещество.

Таблица 25

Характеристика отдубины

Органическая масса				Рабочее топливо		
C_o	H_o	$O_o + N_o$	Q_o^o	W_p	A_p	Q_p^H
49,4	5,7	44,9	4520	69,4	2,3	860

Ивовое корье, обычно идущее для дубления кож, имеет влажность 40—42% и зольность, отнесенную к абсолютно сухому веществу, 5%. Низшая теплотворная способность 2200 ккал/кг.

Проф. Кириш дает для корья ивы выход летучих до 75,5%.

4. ГАЗИФИКАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАСТИТЕЛЬНЫХ ОТХОДОВ

Растительные отходы являются одной из разновидностей древесного топлива. Сравнительный элементарный и технический анализ этих топлив показывает, что состав их органической массы колеблется в сравнительно узких пределах. Особенно суживаются эти пределы, если рассматривать данные, относящиеся к более ограниченным группам. Естественным следствием этого является и малое различие их теплотворной способности, в чем нетрудно убедиться из сравнительных данных табл. 26.

Таблица 26

Сравнительные данные состава различных твердых топлив

Наименование топлива	Органическая масса				Рабочее топливо			
	C_o %	H_o %	$O_o + N_o$ %	Q ккал/кг	W_p %	A_p %	Q_p^H ккал/кг	
Дуб	50,7	6,05	43,25	4530	82,0	45,0	2,1	2130
Береза	49,3	6,10	44,60	4590	87,5	50,4	0,7	1940
Ольха	49,0	6,25	44,75	4540	86,5	51,0	1,4	1855
Осина	48,8	6,10	45,10	4450	87,0	44,0	1,1	2180
Сосна	50,2	6,0	43,80	4740	85,0	57,4	1,4	1700
Солома	44,9	5,4	49,7	4670	—	8,0	5,0	3850
Лузга подсолнечная	51,7	6,3	42,0	4700	80,1	15,0	2,0	3860
Лузга хлопковая	47,4	6,4	46,2	4630	—	15,0	2,0	3700
Отдубина	49,4	5,7	44,9	4520	45,5	69,4	2,3	800—1000
Кизяк	48,4	6,0	45,6	4210	—	25,0	20,0	3580

Высокий выход летучих, доходящий у растительных отходов до 87%, объясняется тем, что их органическая масса построена большей частью из молекул теплоустойчивых, легко разрушающихся при нагревании и образующих при этом относительно большое количество газообразных продуктов разложения. Высокое содержание кислорода в органической массе указывает, что топливо образовано сложными кислородсодержащими соединениями, которые характеризуются малой теплоустойчивостью и при разложении претерпевают изменения, сопровождаемые отщеплением постепенно упрощающихся в структуре кислородных соединений. Высокая разница в теплотворной способности горючего вещества и рабочего топлива

объясняется прежде всего высоким содержанием влаги, поэтому для эффективного использования топлива процесс его предварительной сушки является совершенно обязательным.

Несмотря на малое различие в составе и в теплотворной способности группы представителей древесной растительности, приведенной в табл. 26, следует все же отметить, что газификационные характеристики древесины (в обычном смысле этого понятия) в ряде случаев значительно отличаются от газификационных характеристик растительных (травянистых) отходов. Значительный экспериментальный материал по данному вопросу, подтверждая это положение, убеждает в том, что растительные отходы представляют самостоятельную группу технологического топлива, наделенную своими свойствами и своими, только им присущими особенностями.

1. Показатели газификации основных групп твердого топлива

Изучение физико-химических особенностей твердых топлив, применяемых для газификации в целях получения силового моторного газа, а также их газификационных характеристик показывает, что, несмотря на все их многообразие, эти топлива можно свести к небольшому числу групп. Известно, что главнейшими характеристиками газификации твердого топлива, оказывающими решающее влияние на выбор конструкции газогенератора и режим процесса, являются спекаемость топлива и его смолистость. Следовательно, при объединении твердых топлив в группы по их отношению к газификации правильнее всего было бы исходить из упомянутых выше признаков. Именно таким путем пошел проф. Шишаков, предложив классификацию, состоящую из четырех групп, в последнюю из которых, вероятно, им были включены и растительные отходы, наряду с дровами и торфом.

Однако экспериментальный материал по газификации растительных отходов дает основания классификацию проф. Шишакова дополнить самостоятельной пятой группой.

Вследствие этого, в целом, классификация будет располагать следующей характеристикой групп.

I группа — топлива, неспекающиеся и практически не дающие смолы при газификации.

II группа — топлива, спекающиеся и дающие смолу при газификации.

III группа — топлива, неспекающиеся и дающие смолу при газификации.

IV группа — топлива, неспекающиеся и дающие при газификации смолу.

V группа — топлива спекающиеся смолистые, дающие при газификации смолу и жирные кислоты, растворимые в фенольных водах.

Указанные выше два признака спекаемость и смолистость связаны с температурным режимом газогенератора и его тепловым

напряжением; в табл. 27 мы приводим показатели газификации основных типичных представителей твердых топлив по группам в газогенераторах силового газа.

Таблица 27

Основные показатели газификации твердых топлив

Виды топлив	Весовое напряжение сечения шахты в кг/м ² /час	Тепловое напряжение сечения шахты тыс. ккал/м ² /час	Низшая теплотворная способность газа в ккал/м ³	Количество смолы на рабочее топливо в %
I группа				
Антрацит	120	840	1235	—
II группа				
Газовый уголь	100—150	640—960	1300	2,7—5,0
III группа				
Бурые угли	150—175	980—1200	1340	1,8—5,5
IV группа				
Дрова	320	1180	1350	3,0—7,0
Торф	220	850	1420	5,0—7,0
V группа				
Солома	150—170	600—700	1100—1200	4,0—9,0
Костра	160—180	650—750	1115—1250	7,0—10,0

Остановливаясь пока на самых общих особенностях представителей V группы топлива, следует прежде всего указать на их разнообразие, крайне важное для оценки газификационных свойств этих топлив. Так например, отходы в виде тонкого травянистого стебля обладают малым насыпным весом, что резко снижает их теплоплотность в слое, равную, например, для соломы $6 \cdot 10^4$ ккал/м³.

Наоборот, зернистые отходы дают в естественной насыпи слой значительной плотности с высоким гидравлическим сопротивлением, ставящим ряд препятствий для ведения генераторного процесса по известным в технике методам.

Зольность растительных отходов различна и зависит, в первую очередь, от вида растения, климатической зоны и состава почвы. Наибольший выход золы, доходящий до 8—11%, дают солома овса и лист хлопка. Количество серы в сухой массе растительных отходов колеблется в пределах 0,1—0,2%. Одним из важных параметров в оценке растительных отходов как топлива для газомоторных установок является характеристика точек состояния золы этих топлив. Наиболее легкоплавкой оказывается зола соломы и костры (850—1100°) и наиболее тугоплавкой зола отходов хлопка (до 1700°). Точно так же как зольность зависит от условий произрастания растения, так и на точки состояния золы и ее плавкость оказывает решающее влияние состав солей в почве.

Весьма различно и качество смолы этих топлив; так, смола соломы — черная вязкая, смола льняной костры менее вязкая, маслянистая с зеленоватым оттенком и высоким эффектом люминесценции. Эта смола в большей своей части хорошо сгорает в двигателе внутреннего сгорания. Интересными, с точки зрения перспектив использования в сельском хозяйстве для борьбы с сельскохозяйственными вредителями, являются фенольные воды, получаемые при газификации соломы, и смолы (при газификации по обращенному процессу), которые, в результате разгонки, могут дать дефицитные в сельском хозяйстве колесные мази.

2. Общие свойства растительных отходов как газогенераторного топлива

Как показывают история техники газификации твердых топлив и опыт, генераторный газ практически можно получить из любого вида твердого топлива. Однако качество генерируемого газа не всегда получается одинаковым, не всегда равноценны применяемая технология и способ ведения самого процесса газификации. Качество и ценность любого сорта вида или группы твердого топлива как сырья для газогенераторных установок определяются целым рядом особенностей, которые в последующем мы будем называть общими газификационными характеристиками твердого топлива.

Опыт исследования газификации твердых топлив показывает, что эффективность генераторного процесса и зависит от этих газификационных характеристик твердого топлива, к которым следует отнести: активность топлива, его реактивность, плотность, битуминозность, способность к спеканию, размер частиц, влажность, содержание в топливе серы и, наконец, его зольность.

Перейдем к определению перечисленных выше газификационных характеристик для растительных отходов.

а) Активность

По общему смыслу под активностью твердого топлива обычно понимают скорость превращения углекислоты в окись углерода. Для выяснения факторов, влияющих на активность топлива, был проведен ряд исследований. Так, например, Берг в результате подобных работ пришел к выводу о том, что:

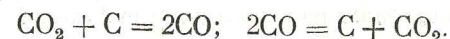
1) наибольшее влияние на активность оказывает структура молекул углерода в данном топливе и

2) чем ближе эта структура к древесному углю, тем активнее топливо, и наоборот, чем ближе она к графиту, тем оно менее активно.

Экспериментальные исследования, проведенные Ленинградской лесотехнической академией имени С. М. Кирова над газификацией мелкого угля и щепы, исследования автора по газификации соломы и других растительных отходов достаточно точно установили, что мелкое топливо более активно, чем крупное; по времени восстановления и качеству генерируемого газа мелкое топливо, как правило, дает лучшие показатели. Это положение легко объяснимо, так как известно, что реакции горения протекают на поверхности газифи-

цируемого топлива и очевидно, чем больше эта активная поверхность, тем быстрее и течение реакций.

В качестве иллюстрации сказанного можно привести пусковые свойства газогенератора для газификации соломы. Последняя, являясь представителем топлива с высокой активностью, требует короткого периода времени для установления генераторного процесса, равного всего лишь 1—2 мин. Установлено, что в условиях высоких температур, которые развиваются при горении топлива, CO_2 реагирует с углеродом по двум реакциям, скорость протекания которых различна.



Скорость протекания первой реакции, имеющей большое практическое значение, в 166 раз выше скорости протекания второй реакции.

Если через K_1 и K_2 обозначить коэффициенты скоростей обеих реакций, то скорость восстановления можно выразить следующим равенством:

$$\frac{d(\text{CO})}{dt} = K_1(\text{CO}_2) - K_2(\text{CO})^2,$$

где CO и CO_2 — концентрация окиси углерода и углекислоты в кг/мол.

Для температуры выше 900°C скорость обратной реакции можно принять равной нулю ($K_2 = 0$), тогда:

$$\frac{d(\text{CO})}{dt} = K_1(\text{CO}_2).$$

Значения коэффициента K_1 скорости первой реакции для мелкозернистого топлива диаметром частиц до 5 мм приведены в табл. 28.

Таблица 28

Значения коэффициента скорости реакции для мелкозернистого топлива

Температура в $^\circ\text{C}$	K_1 для топлива с размерами частиц 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	—	1,480	0,579

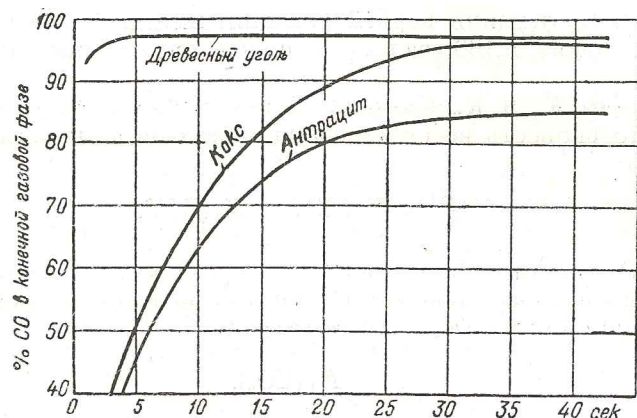
Разница в скорости восстановления в зависимости от свойств топлива показана на фиг. 11.

Из приведенных в графике кривых видно, что наиболее интенсивно процесс восстановления протекает при прохождении угле-

кислоты через древесный уголь, а наиболее медленно при прохождении через антрацит. Быстрое превращение в кокс таких топлив как солома, костра, лузга дает основание предполагать, что скорость восстановления здесь будет близка к древесному углю.

По степени активности растительные отходы, приведенные в нашей классификации, можно распределить в следующем порядке. На первое место по активности следует поставить топлива II класса, к которым мы отнесли мелкозернистые отходы с величиной зерна до 10 мм.

Здесь особо следует отметить костру, полосу, отходы хмеля. Второе место принадлежит растительным отходам I класса, однако,



Фиг. 11. Образование окиси углерода в зависимости от свойств топлива по времени.

в случае дробления стеблей, представляющих основную массу этих отходов, эти топлива могут оказаться по активности наравне с топливами II класса. На третье место следует поставить отходы III и IV классов.

Активность топлива зависит также от способа подготовки его к газификации. Дробление, резка или иной способ измельчения растительного топлива являются благоприятными факторами, существенно сказывающимися на повышении активных свойств топлива.

б) Реактивность

Основой процесса горения, как известно, являются реакции горения и характер их протекания. Все остальные факторы и явления связаны либо с созданием температурных условий, либо условий контактирования реагирующих веществ. Способность топлива к реакции горения определяется степенью его реактивности, т. е. количеством кислорода, вступающим в реакцию с углеродом горючего на определенной поверхности в единицу времени при определенной температуре. Количественно реактивная способность опре-

деляется отношением объема CO_2 , превращенного в CO , к первоначальному объему или по уравнению:

$$R = \frac{\frac{\Sigma C}{O}}{\left(\frac{\Sigma C}{O}\right)_{\max}} \cdot 100,$$

где $\frac{\Sigma C}{O}$ — отношение количества углерода, вступившего в реакцию, к количеству прореагировавшего кислорода,

$\left(\frac{\Sigma C}{O}\right)_{\max}$ — то же отношение, но при условии установления равновесия, соответствующего процессу: $\text{CO}_2 + \text{C} \rightleftharpoons 2\text{CO}$.

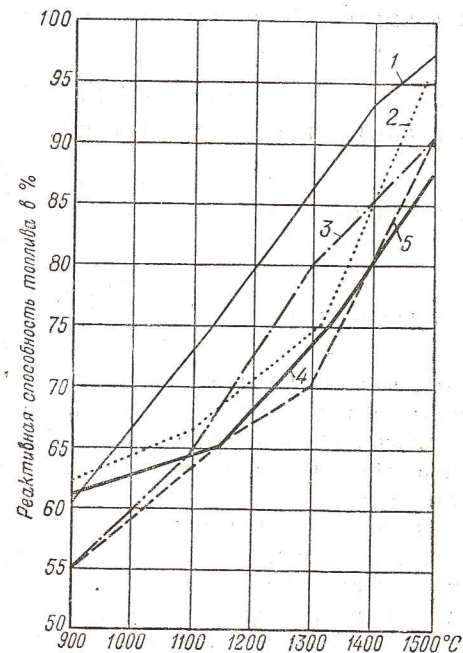
Таким образом, реакционная способность топлива, выраженная тем или иным количеством, всегда тем больше, чем больше выход CO .

В связи с этим, реактивность твердого топлива тесно связана с развиваемыми температурами, которые в конечном счете являются главнейшим параметром, определяющим характер и интенсивность протекания реакций газификации.

На фиг. 12 приводятся данные по определению реактивной способности различных топлив. Здесь следует отметить, что при температуре 1500°C реактивная способность различных сортов горючего колеблется в пределах всего лишь 10%.

К аналогичным результатам приводит определение реактивной способности древесного угля, кокса из печей, ульевого кокса и ретортного угля. Реактивная способность этих четырех сортов горючего, определяемая количеством восстановленной им двуокиси углерода при температуре 1000°C , была следующая: для древесного угля 97%, для кокса из печей 70%, для кокса ульевых печей 43% и для ретортного угля 26%. При $1500-1600^\circ$ реактивная способность всех четырех указанных сортов горючего становилась равной 100%.

Причина того, что при высоких температурах реактивная способность различных сортов горючего оказывается одинаковой, лежит



Фиг. 12. Реактивная способность различных топлив.
1 — швель — кокс, 2—3 — кокс, 4—5 — кокс из ульевых печей.

прежде всего в том, что скорость реакций с повышением температуры растет очень быстро.

Важнейшим фактором реактивности топлива, имеющим особое значение для растительных отходов, является величина поверхности топлива в объеме ($F_p - м^2/м^3$), которая для естественного насыпного слоя растительного топлива варьирует в больших пределах.

Возьмем какую-либо весовую единицу горючего и допустим для простоты рассуждений, что горючее состоит из шаров одинакового диаметра, в одном случае d_1 , в другом d_2 . Если в первом случае число кусков горючего в весовой единице будет n_1 , а во втором случае n_2 , то мы должны иметь равенство:

$$\frac{3}{4} \pi n_1 d_1^3 \gamma = \frac{3}{4} \pi n_2 d_2^3 \gamma,$$

где γ — удельный вес горючего.

После сокращения находим, что

$$n_1 : n_2 = d_2^3 : d_1^3.$$

Поверхность F_p всех кусков горючего в том и другом случае будет равна соответственно:

$$F_{p_1} = 4\pi n_1 d_1^2 \quad \text{и} \quad F_{p_2} = 4\pi n_2 d_2^2.$$

Отношение поверхностей будет равно:

$$F_{p_1} : F_{p_2} = n_1 d_1^2 : n_2 d_2^2.$$

Подставляя сюда:

$$n_1 = n_2 \frac{d_2^3}{d_1^3},$$

получаем, что

$$F_{p_1} : F_{p_2} = d_2 : d_1,$$

т. е., что общая поверхность всех кусков, заключенных в весовой единице, изменяется обратно пропорционально диаметру.

Следовательно, при уменьшении размеров кусков, например, в два раза, величина реактивной поверхности горючего увеличится тоже вдвое.

Воздух, поступающий в слой более мелкого горючего, встречает большую реактивную поверхность и потому процесс сгорания в углекислоту совершается в меньшем объеме, и обратно, на высоко развитой поверхности раскаленного углерода происходит более интенсивное восстановление углекислоты в окись углерода.

Установим влияние изменения F_p на процессы восстановления CO_2 и H_2O . Проанализируем реакцию $CO_2 + C$, отметив попутно, что распределение концентрации CO_2 в слое не подчиняется дифференциальному уравнению

$$-\frac{dc}{dz} = \varphi \cdot F_p \cdot \bar{C},$$

так как реакция $CO_2 + C$ даже для древесного угля при температуре до $1100^\circ C$ находится в чисто кинетической области, когда реагирование протекает во всей массе кокса и практически совершенно не

зависит не только от скорости конвективного переноса вещества, но и от диффузии через поры угля или кокса. По Чуханову кинетическое уравнение этой реакции в общем виде может быть примерно выражено так:

$$-\frac{dx}{dt} = K_0 \cdot l^{\frac{-q}{RT}} \cdot x^n \cdot F_p,$$

где x — концентрация CO_2 ;

q — энергия активации реакции;

n — порядок реакции;

t — время;

T — температура углерода;

F_p — общая реакционная поверхность углерода в $м^2/м^3$.

Порядок реакции $CO_2 + C$, как известно, лежит между первым и нулевым и, согласно приведенному выше уравнению, независимо от механизма реакции, ее порядка и энергии активации скорость реагирования (следовательно и выход CO) будет увеличиваться с увеличением F_p , т. е. с увеличением насыпного веса или плотности топлива в слое.

Наряду с плотностью топлива в слое важна и его механическая прочность; в противном случае образующаяся мелочь создает в слое газифицируемого топлива участки высокого сопротивления, которые приводят к нарушению нормального процесса.

Условиям плотности в естественном насыпном слое в качестве газогенераторного топлива удовлетворяет лишь только топливо II класса нашей классификации. Эти топлива могут употребляться для газификации в своем натуральном виде без предварительной обработки. Топлива I, III и IV классов в целях увеличения их плотности в слое должны измельчаться, или, как это установлено нашими исследованиями, они могут употребляться и в натуральном виде, но с определенной плотностью в слое, получаемой путем прессования на специальных прессах или в самом газогенераторе посредством поршней — уплотнителей.

в) Битуминозность

Под битуминозностью понимают содержание в топливе летучих веществ. Этот качественный показатель твердого топлива является одной из главнейших его газификационных характеристик, определяющих, как известно, конструкцию газогенератора и технологическую схему процесса в целом. Эта характеристика растительных отходов близка к древесине; здесь количество летучих в среднем может быть оценено в 85% на органическую массу, что при газификации этих топлив на силовой газ определяет преимущественный выбор обращенной схемы газификации.

Смолистые соединения в сельскохозяйственных растениях крайне разнообразны по своему составу и физико-химическим свойствам, часть этих соединений (определенные фракции), например в отходах масличных растений (костра, лужга), может в виде смоляного тумана, насыщающего генераторный газ, с большим эффектом сжигаться в цилиндрах двигателей внутреннего сгорания.

г) С п е к а н и е

Свойство газогенераторного топлива сохранять свою форму при прохождении по зонам газогенератора без значительных изменений является важной его характеристикой, определяющей одну из качественных сторон процесса газификации твердого топлива. Спекание топлива в большие куски затрудняет его движение по шахте и приводит к образованию в слое топлива пустот и прогаров; обычно это связано с падением температур и увеличением в составе газа углекислоты.

Измельчение кусков топлива за время его пребывания в газогенераторе также отрицательно сказывается на качественных показателях процесса газификации. Как правило, это приводит к резкому возрастанию сопротивления слоя, обеднению питания его воздухом и снижению температур. В качестве примера можно привести разбухание и разрушение в бункере газогенератора брикетов из соломы или спекание древесного угля, плохо выжженного, засоренного землей и песком. Большинство растительных отходов при газификации подвержено в той или иной мере спеканию, причем здесь необходимо различать два вида спекания — одно, вызываемое обильным выделением летучих в зонах подготовки газогенератора, и второе — обусловленное наличием в топливе земли и песка и обычно протекающее в поясе высоких температур. В первом случае по существу мы имеем не спекание, а явление «слипания» мелких легких частичек топлива под действием обильного выделения летучих. Это обстоятельство является одной из причин необходимости применения специальных шуровочных приспособлений в газогенераторе для разрыхления и опускания слоя топлива, или систематического ручного обслуживания шахты путем управления слоем сверху шуровочным ломиком.

Второй вид спекания обуславливается наличием в топливе механических минеральных примесей и свойствами и составом самой золы. Это спекание начинается уже в зоне воздушных фурм и связано с возникновением озоления растительного кокса. Процесс спекания протекает неравномерно по сечению слоя и обычно возникает в том месте, где движение топлива по тем или иным причинам нарушено или произошла закупорка живого сечения колосниковой решетки.

д) З о л ь н о с т ь

Среди газификационных характеристик твердого топлива зольность топлива и свойства золы занимают особое место. Для растительных отходов свойства золы представляют особый интерес, так как они, будучи связаны с составом почвы, питательная среда которой часто улучшается путем введения искусственных удобрений, часто являются источником разнообразных трудностей в ведении процесса газификации. Таким образом, с точки зрения зольности и свойств золы было бы ошибочным говорить, предположим, о соломе, как генераторном топливе вообще. Следует иметь в виду конкретную солому, конкретную в смысле ее вида (пшеница, рожь,

овес) и места произрастания с данными почвенными и климатологическими условиями ее роста.

В табл. 29 приведена зольность некоторых растительных отходов.

Из приведенных данных видно, что зольность растительных отходов выше, а в некоторых случаях значительно выше зольности древесины (зольность березы около 1%). Зольность южной соломы выше зольности соломы северной полосы, наконец, зольность соломы овса самая высокая из всех соломистых растительных отходов. Примеси минерального происхождения, входящие в состав стебля растения после сжигания, остаются в виде золы и шлака, но уже в измененном составе по следующим причинам:

- а) образование кремнеземом сложных силикатов,
- б) распада карбонатов кальция на окись кальция и углекислоту по реакции: $\text{CaCO}_3 = \text{CaO} + \text{CO}_2$,
- в) редукции сульфатов и фосфатов,
- г) графитизация кокса,
- д) улетучивание некоторых составных частей.

Эти изменения обычно приводят к образованию шлаков, отрицательно сказывающихся на процессе газификации слоя топлива.

Таким образом, мы подошли к одной из важных газификационных характеристик растительных отходов — к температуре плавления золы. Указание акад. Павлова на то, что процесс шлакования топлива — это процесс чисто металлургический — в значительной мере содействует уяснению общих положений такой «плавки» и роли компонентов, которые в ней участвуют. В свете этого, например, оказывается важным знать, что основным составляющим золы соломы является SiO_2 , а золы отходов хлопчатника CaO . Плавкость минеральных примесей определяется отношением:

$$\frac{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO}}$$

и чем это отношение больше, тем температура плавления золы выше.

Точно так же плавкость золы зависит от отношения содержания глинозема к содержанию кремнезема и от отношения глинозема к остальным основаниям. Чем меньше глинозем и кремнекислоты и чем меньше содержание оснований, тем зола более легкоплавка. Это положение в полной мере может быть отнесено к золе соломы, польни и другим топливам этого типа, являясь основным источником трудностей в подборе оптимальных тепловых параметров газификации этих топлив и получения стабильного процесса. Высокая реактивная способность кокса этих топлив благоприятна для concentra-

Таблица 29

Зольность растительных отходов

Наименование отхода	Зольность в %
Солома северной озимой пшеницы	3—4
Солома южной озимой пшеницы	6—7
Солома южной яровой пшеницы	4—5
Солома овсяная	7—8
Лузга подсолнечная	2—3
Лузга хлопковая	2—2,5
Костра льняная	3—4
Лист хлопка	7—11

ции температур в местах сосредоточенной подачи воздуха и является главным источником шлакования. Исследования этого вопроса показали, между прочим, что рассредоточение кислородной золы по определенной схеме дает возможность значительно снизить эффект шлакования, а в ряде случаев и совершенно его устранить. Отношение золы растительных отходов к температурам представлено данными табл. 30, где указаны точки состояния золы для типичных представителей отходов всех четырех классов.

Эти данные иллюстрируют уже высказанное нами ранее положение о большом диапазоне температур точек состояния для различных типов растительных отходов. Кроме этого, следует указать, что приведенные в табл. 30 данные для соломы относятся к северным районам ее произрастания: для УССР и особенно ее южной части точки состояния золы соломы будут ниже.

Таблица 30

Точки состояния золы различных растительных отходов

Наименование растительного отхода	Точки состояния в °С		
	T_1	T_2	T_3
Солома натуральная	550	750	950—1000
Солома брикет	600	800	1100—1200
Лузга подсолнечная	1000	1200	1230
Костра льняная	750	950	1000—1100
Рисовая шелуха	800	900	1100
Кукурузный початок	900	950	970
Гуза-шай	720	1500	1700
Жесткие травы	600	850	1000
Тростник	500	800	1000

е) Размер частиц топлива

Гранулометрический состав топлива оказывает большое влияние на протекание процесса газификации, интенсивность и качество получаемого газа. Это обстоятельство послужило одним из главных поводов к установлению классификации растительных отходов, основанной на физической структуре натурального топлива. Основные реакции генераторного процесса являются, как известно, гетерогенными, т. е. протекающими в плоскости соприкосновения двух фаз — твердой и газообразной в отличие от газовых, гомогенных, идущих во всем объеме. Поэтому размерность кусков газифицируемого топлива имеет большое влияние на работу газогенератора. От величины кусков топлива зависит удельная поверхность, т. е. поверхность топлива, приходящаяся на единицу объема.

Так как с увеличением активной поверхности топлива растет скорость реакций, то вместе с этим повышается и общая эффективность генераторного процесса. Для древесных чурок твердой породы размером 5×6 см реактивная поверхность равна $96,8 \text{ м}^2/\text{м}^3$, для

дубовых стандартных дров значительно меньше и равна всего лишь $44,3 \text{ м}^2/\text{м}^3$. Из этого следует, что по мере уменьшения размера топлива растет и его реактивная поверхность. Гранулометрический состав растительных отходов, как мы уже отмечали, исключительно разнообразен, а вместе с этим различна и реактивная поверхность этих топлив в свободной насыпи. Действительно, если для такого топлива, как лузга, значение реактивной поверхности, отнесенное к единице объема, может быть величиной постоянной, то, наоборот, для топлива I класса реактивная поверхность является величиной функциональной и связанной в первую очередь с видом топлива, способом укладки и, наконец, со способом его подготовки для газификации. Возьмем для примера солому: солома в снопе имеет одну реактивную поверхность, солома комбайновая — другую. В первом случае реактивная поверхность будет более высокая, чем во втором. Для иллюстрации сказанного приведем некоторые данные по соломе в зависимости от способа ее подготовки для газификации.

Насыпной вес 1 м^3 соломы комбайновой уборки составляет $17 \text{ кг}/\text{м}^3$ с соответствующей этому весу реактивной поверхностью в $140 \text{ м}^2/\text{м}^3$. Уплотнение соломы повышает реактивную поверхность до $600 \text{ м}^2/\text{м}^3$ и, наконец, измельчение ее на соломорезке доводит величину реактивной поверхности до $700 \text{ м}^2/\text{м}^3$. Реактивная поверхность брикетированной соломы равна всего лишь $75 \text{ м}^2/\text{м}^3$ и в этом случае близка к реактивной поверхности древесины чурок. Таким образом, из рассмотренного следует сделать вывод о том, что для интенсификации газогенераторного процесса наиболее выгодно измельченное топливо.

Однако слишком мелкий гранулометрический состав топлива при его газификации по обычно применяемым в технике методам приводит к высоким гидравлическим сопротивлениям и отрицательно сказывается на работе всей газомоторной установки в целом.

Следовательно, рост сопротивления слоя лимитирует размер кусков топлива и определяет режим генераторного процесса в целом. Пределом измельчения топлива является пыль, газификация которой немислима в слоевом газогенераторе. Таким образом, размер частиц растительных отходов определяет важнейший вопрос газификации растительного топлива, заключающийся в изыскании рациональных способов технологии его подготовки для газификации в строгом соответствии с его физико-химическими особенностями.

ж) Влажность топлива

Содержание влаги в топливе является важной характеристикой его кондиционности и пригодности в качестве генераторного топлива. Прежде всего с увеличением влажности топлива уменьшается его низшая теплотворная способность. Это происходит вследствие того, что увеличиваются затраты тепла на испарение гигроскопической влаги и уменьшается процентное содержание органической массы.

В газогенераторах обратного процесса пары воды проходят через активный слой и реагируют с раскаленным углеродом по реакции водяного газа.

При газификации растительных отходов древесины, а также торфа суммарное количество гигроскопической и химической влаги всегда больше, чем это необходимо для течения реакций, расходующих воду. В этом случае получающийся избыток водяных паров переходит в газогенераторный газ и определяет, таким образом, его влагосодержание.

Исследования показывают, что увеличение влажности оказывает влияние на снижение температур в активной зоне газогенератора и характер протекания реакций генераторного процесса. В связи с этим химический состав газа ухудшается, а мощность двигателя начинает падать. В табл. 31 приводятся данные о влиянии влажности топлива на мощность двигателя.

Таблица 31

Влияние влажности топлива на мощность двигателя

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

Высокое содержание влаги в топливе снижает термический коэффициент полезного действия газогенератора и приводит к увеличению расхода топлива.

Во всех случаях, касающихся вопроса влагосодержания и установления технических условий на топливо как газогенераторное сырье, следует иметь в виду, что весовое количество воды, подводимое в газогенератор, определяется типом процесса и видом

газифицируемого топлива, содержанием в нем влаги и режимом работы газогенератора.

Весовое количество влаги, идущей на образование H_2 , CH_4 , C_2H_2 , дает нам формула:

$$W_b = 0,804(H_2 + 2CH_4 + 2C_2H_4) \frac{\text{кг} \cdot \text{воды}}{\text{м}^3 \text{газа}},$$

где 0,804 — вес 1 м³ водяных паров при 0° С и 760 мм рт. ст.

H_2 , CH_4 , C_2H_4 — объемные содержания водорода, метана и этилена в 1 м³ газа, а весовой расход на 1 кг газифицируемого топлива дает нам следующее выражение:

$$W_b^k = \frac{0,804(H_2 + 2CH_4 + 2C_2H_4) [C_p - (C_y + C_n + C_t)] - (9H_p + W_p)}{0,536(CO_2 + CO + CH_4 + 2C_2H_4)} \frac{\text{кг} \cdot \text{воды}}{\text{кг} \cdot \text{топлива}},$$

где W_b^k — весовой расход воды на 1 кг газифицируемого топлива,

H_p — весовое содержание водорода в 1 кг газифицируемого топлива

W_p — весовое содержание влаги в 1 кг газифицируемого топлива.

Отмеченное влияние влаги на качественные показатели генераторного газа и контроль за влажностью топлива должны быть предметом особого внимания, когда дело касается растительных отходов. Большинство из них обладает повышенной адсорбционной способностью, а сильно развитая поверхность этих топлив оказывается благоприятной для поглощения атмосферной влаги.

С другой стороны, последнее обстоятельство является положительным для сушки этих топлив; почти все без исключения они быстро отдают влагу.

Наружная адсорбирующая поверхность растительных отходов к моменту их сбора и последующего хранения растрескивается и становится хорошим проводником влаги вглубь ткани. В то же время следует отметить, что количество адсорбционной воды в растительных отходах зависит от типа и природы растения и упругости водяного пара в окружающей среде. Значительное колебание влажности растительных отходов даже в течение только лишь одних суток (в условиях их хранения под навесом) является особенностью, которую необходимо иметь в виду при установлении технологии подготовки растительных отходов для газификации и организации режима самого процесса. Для ряда случаев, даже для воздушно сухих растительных отходов суммарное количество заключенной в них химической и гигроскопической влаги часто является причиной значительного снижения температур в активной зоне газогенератора, ухудшения состава газа и заставляет прибегать к искусственной подсушке топлива. Малая тепловая инерция газифицируемого слоя этих топлив, характерная коротким пусковым периодом (периодом розжига), требует топлива с небольшим процентом влажности (относительной), не превышающим 8—10%.

з) Содержание серы

Содержание серы в генераторном газе зависит от ее количества в топливе и может меняться в широких пределах. Без специальной очистки, как известно, такой газ не пригоден для употребления в двигателях внутреннего сгорания.

Растительные отходы, точно так же как древесина и некоторые сорта торфа, могут считаться бессерными, свободными как от минеральной, связанной с неорганическим веществом серы, так и от серы органической.

Таким образом, газогенераторные устройства для газификации растительных отходов исключают необходимость в установке специальных сероочистительных аппаратов.

5. МОТОРНЫЕ СВОЙСТВА ГЕНЕРАТОРНОГО ГАЗА ИЗ РАСТИТЕЛЬНЫХ ОТХОДОВ

Разбирая различные характеристики растительных отходов как топлива для газификации мы имеем в виду конечный продукт процесса газификации, — генераторный газ, используемый в дальнейшем как горючее в двигателе внутреннего сгорания.

Следовательно, наряду с уже изложенными свойствами растительных отходов как генераторного топлива для нас основной, конечный интерес представляют характеристики генерируемого из этих отходов газа как моторного горючего.

Генераторный газ, получаемый в результате процесса газификации, представляет механическую смесь нескольких газов, каждый

из которых обладает собственными физико-химическими характеристиками и по-своему влияет на работу двигателя.

Химический состав генераторного газа колеблется в широких пределах в зависимости от вида топлива, параметров и условий газификации, что, естественно, влечет за собою изменение параметров, определяющих генераторный газ как моторное топливо. Характеристика газообразного топлива, согласно определениям этого понятия, принятого в русской теплотехнической литературе, достаточно полно выражается величиной β

$$\beta = \frac{21 - CO'_{2\max}}{CO'_{2\max}} = \left(\frac{21}{CO'_{2\max}} - 1 \right). \quad (1)$$

Если принять, что максимальное количество CO'_2 при $\alpha = 1$ будет равно:

$$CO'_{2\max} = \frac{100(CO_2 + CO + CH_4)}{CO_2 + CO + CH_4 + N_2 + 3,76 \left(\frac{CO}{2} + \frac{H_2}{2} + 2CH_4 - O_2 \right)},$$

то после подстановки в формулу (1) полученного значения $CO'_{2\max}$ и величины

$$N_2 = 100 - (CO_2 + O_2 + CO + H_2 + CH_4)$$

будем иметь для β следующее выражение:

$$\beta = \frac{21 - (CO_2 + O_2 + 0,605CO) + (0,185H_2 + 0,58CH_4)}{CO_2 + CO + CH_4}.$$

Характеристика моторного газа β не является величиной постоянной и меняется в зависимости от изменения свойств топлива. Так значение β больше при загрузке свежего топлива и уменьшается по мере его коксования в газогенераторе.

Средняя величина β для моторного газа равна 0,0545 и она выше, чем для первичного топлива ($\beta_m = 0,0505$).

Зная величину β , нетрудно выразить баланс кислорода для моторного газа, получаемого методом газификации твердого топлива, следующим образом:

$$O_2 + (1 + \beta)CO_2 + (0,605 + \beta)CO - (0,58 - \beta)CH_4 - 0,185H_2 = 21\%.$$

Коэффициент избытка воздуха α газогенератора при этом будет равен:

$$\alpha = \frac{1}{1 + 3,76 \left[\frac{0,5(CO - H_2) + (2CH_4 - O_2)}{N_2} \right]}.$$

В противоположность жидким моторным топливам, имеющим для определенного типа практически постоянный состав и теплотворную способность, калорийность и состав, генераторный газ меняется с изменением режима работы двигателя.

Соотношения, с достаточной степенью точности охватывающие данные, полученные в результате опытов, имеют вид:

$$\Delta CO = 16,44 + 92 \cdot 10^{-1} \cdot n - 1,7 \cdot 10^{-6} \cdot n^2 \text{ \% объема}$$

$$\Delta H_2 = 4,6 + 8 \cdot 10^{-4} \cdot n \text{ \% объема}$$

$$\Delta CO_2 = 6,0 - 10^{-5} \cdot n \text{ \% объема}$$

и вместе с тем теплотворная способность газа:

$$H_u = 765 + 2827 \cdot 10^{-4} \cdot n - 44,44 \cdot 10^{-6} \cdot n^2 \text{ ккал/м}^3.$$

В силу этих причин, при работе двигателя на генераторном газе меняется и коэффициент избытка воздуха α , находясь в пределах 1,1—1,27.

Показатель политропы сжатия n_1 , вследствие меньших значений адиабатических показателей газовой смеси, заметно ниже аналогичных величин для двигателей жидкого топлива ($n_1 = 1,21—1,29$).

В совокупности с пониженной величиной давления конца всасывания это приводит к уменьшению температуры и давления конца сжатия.

Эмпирическая зависимость, показывающая связь $n_1 = f(n)$, представляется в виде:

$$n_1 = 1,336 - \frac{104}{n}$$

Связь же

$$P_z = f(\Sigma)$$

для жидкого топлива

$$P_z = 8,0(\Sigma - 1),$$

а для генераторного газа

$$P_z = 4,0 - 4,5(\Sigma - 1).$$

Из уравнения эффективной мощности двигателя

$$N_e = kV n \frac{H_u}{1 + \alpha L_0} \eta_v \eta_i \eta_m \eta_c \text{ л. с.}$$

видно, что эффективная мощность двигателя зависит от теплотворной способности газа, коэффициента наполнения, от термического, механического и относительного коэффициентов полезного действия, а также и от коэффициента избытка воздуха. Практически имеющая место потеря мощности двигателя, переведенного с жидкого топлива на генераторный газ, зависит от уменьшения теплотворной способности рабочей смеси, уменьшения коэффициента наполнения и изменения коэффициента молекулярного изменения.

Абсолютное значение молекулярного изменения определяется эмпирическими зависимостями:

$$\mu_0 = 0,932 - 5 \cdot 10^{-6} n$$

$$\mu = 0,937 - 4 \cdot 10^{-6} n,$$

что ниже аналогичных значений для двигателей жидкого топлива и является одной из причин понижения мощности газового двигателя.

Из выражения:

$$H_u = 30,35 \cdot \text{CO} + 25,7 \cdot \text{H}_2 + 85,7 \text{CH}_4 \text{ ккал/м}^3$$

следует, что теплотворная способность генераторного газа определяется содержанием в нем горючих компонентов CO, H₂ и CH₄. Незначительным количеством имеющихся иногда в газе тяжелых углеводородов обычно пренебрегают или приравнивают их к метану.

В правую часть уравнения индикаторной мощности двигателя входит значение теплотворной способности генераторного газа, т. е.

$$N_i = K \eta_o n H_u$$

указывая на зависимость, которой связаны величины N_i и H_u. Тем не менее, более тщательный анализ показывает, что нередки случаи, когда эта зависимость нарушается в силу того, что теплотворная способность рабочей смеси, определяющая при прочих равных условиях количество калорий, введенных в двигатель в единицу времени, зависит от величины L_o, которая различна для всех компонентов смеси. Следовательно, если при одинаковом значении H_u содержание горючих компонентов будет меняться, то и теплотворная способность рабочей смеси такого генераторного газа с воздухом будет также изменяться. В этом можно убедиться из данных табл. 32, где приведена зависимость теплотворной способности рабочей смеси H_p от состава газа при H_u = 1053 ккал/м³.

Таблица 32

Зависимость теплотворной способности рабочей смеси H_p от состава газа при H_u = 1053 ккал/м³

Состав газа в % по объему			Теорет. необходимое колич. воздуха	Теплотворная способность рабочей смеси H _p ккал/м ³		
CO	H ₂	CH ₄		α=1,0	α=1,1	α=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

Из табл. 32 видно, что разница между теплотворными способностями рабочих смесей доходит до 10%, несмотря на то, что H_u остается одинаковым для всех газов. Отсюда можно сделать вывод о невозможности принимать величину H_u за критерий качества газа. С другой стороны, и величина H_p в формуле:

$$N_i = k H_p$$

является лишь приближенным параметром определения индикаторной мощности (k — коэффициент пропорциональности). Следовательно, выражение для N_i будет справедливо при условии, если увеличение теплотворной способности смеси, коэффициент молекулярного изменения и теплоемкость продуктов сгорания останутся постоянными. В свою очередь для этого необходимо, чтобы при изменении H_g отношения CO : H₂, CH₄ и CO : CH₄ оставались бы постоянными.

Таким образом, судить о качестве генераторного газа как моторного топлива можно только по теплотворной способности его рабочей смеси с воздухом при данном α.

На фиг. 13 показано изменение теплотворных способностей 1 м³ рабочих смесей CO, H₂ и CH₄ в зависимости от коэффициента избытка воздуха: с увеличением α теплотворная способность смеси падает.

Борьба с падением мощности двигателя до сих пор является одной из центральных проблем, связанных с созданием типа двигателя с равноценными показателями для работы как на газе, так и на жидком топливе. Задача по существу состоит в приспособлении двигателя к свойствам нового моторного топлива и получении в этих новых условиях той же мощности, что и при работе на жидком топливе.

Обращаясь вновь к формуле эффективной мощности двигателя, нетрудно заметить, что при замене горючего все переменные, входящие в это уравнение, снижаются. Обратимся к важнейшему члену этой формулы H_p — теплотворной способности рабочей смеси. Для бензино-воздушной смеси ее теплотворная способность будет равна:

$$H_p = \frac{h_u}{\alpha L_o},$$

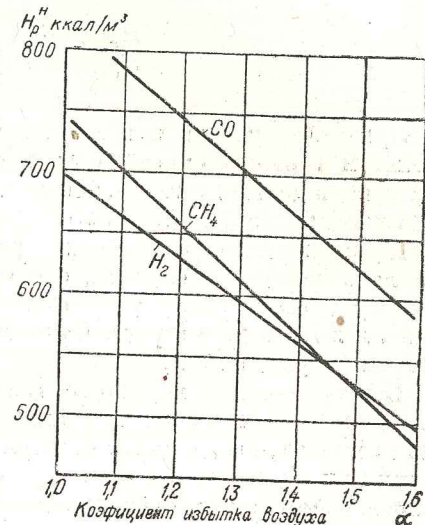
где h_u — теплотворная способность бензина в ккал/кг;

α — коэффициент избытка воздуха;

L_o — теоретически необходимое количество воздуха для сгорания 1 кг топлива.

При α равном единице H_p равно:

$$H_p = \frac{h_u}{L_o} = \frac{10500}{11,75} = 891 \text{ ккал/м}^3 \text{ при } 0^\circ \text{ и } 760 \text{ мм рт. ст.}$$



Фиг. 13. Изменение теплотворной способности 1 м³ рабочих смесей CO, H₂, CH₄ в зависимости от коэффициента избытка воздуха α.

Теплотворная способность газозвдушной смеси генераторного газа будет равна:

$$H_p = \frac{H_u}{1 + \alpha L_0}$$

Тогда, например, для генераторного газа из соломы при $\alpha = 1$

$$H_p = \frac{1200}{1 + 1,2} \approx 545 \text{ ккал/м}^3$$

Таким образом, отношение теплотворных способностей бензино-воздушной и газозвдушной смесей будет:

$$\frac{H_{pr}}{H_{pб}} = \frac{545}{891} = 0,611$$

Практически, как известно, такая разница в теплотворной способности горючих смесей приводит к падению мощности двигателя, доходящей до 40% и выше, что является серьезным фактором, меняющим технико-экономические показатели двигателя.

Необходимость обеспечить равноценность снимаемой с двигателя мощности в случаях его работы как на жидком, так и на газообразном топливах решается путем наддува, повышения степени сжатия и проведения ряда всевозможных второстепенных конструктивных мероприятий.

Восстановление мощности газового двигателя методом наддува до сих пор нельзя считать общепризнанным с точки зрения конечного эффекта, ввиду того, что при высоких степенях наддува расход мощности на компрессор сильно возрастает и действительное приращение мощности становится незначительным.

Некоторые новые искания в этой области изложены в работах последнего времени, проведенных в НАМИ инж. Симановичем при исследовании наддува автомобильных двигателей, работающих на генераторном газе из древесины.

Автор исследования пришел к следующим выводам:

а) наддув от приводного объемного нагнетателя является эффективным средством повышения мощности двигателей, работающих на генераторном газе, путем воздействия на удельный вес свежего заряда и коэффициент наполнения двигателя;

б) в пределах степени наддува $\frac{P_k}{P_0} < 1,8$ приводной объемный нагнетатель позволяет получить при работе на генераторном газе прирост мощности двигателя, приблизительно равный степени наддува;

в) получение наибольшего относительного прироста мощности и оптимального протекания характеристики требует применения корректирующих устройств.

Испытания показали, что установка клапана-корректора предотвращает повышение давления за нагнетателем выше допустимого. В то же время передаточное число $i = 0,75$ обеспечивает достаточно большой относительный прирост мощности в зоне средних оборотов.

К группе других, более распространенных методов, обеспечивающих сохранение мощности двигателя, переводимого на газ, следует отнести следующие:

а) увеличение степени сжатия двигателя, способствующее повышению среднего эффективного давления P_e и улучшению термического к. п. д. η_t ;

б) увеличение диаметра всасывающего клапана приводит к снижению скорости рабочей смеси, повышению коэффициента наполнения η_v и индикаторной мощности N_i , как известно возрастающей пропорционально увеличению η_v ;

в) замена нижних клапанов подвесными;

г) увеличение диаметра всасывающего газопровода.

Сочетания наддува с повышением степени сжатия и другими мероприятиями, вытекающими из физико-химических особенностей генераторного газа как моторного топлива, могут обеспечить двигателю литровую мощность такую же, как и для работы на жидком топливе.

Пределом, ограничивающим форсирование двигателей, приспособляемых для работы на газе, в этом случае будет являться прочность шатунно-кривошипного механизма и тепловая напряженность. Однако наиболее целесообразным представляется постройка специальных газовых двигателей повышенного литража, полностью отвечающих особенностям применения генераторного газа, как моторного топлива.

Перейдем к физико-химическим характеристикам генераторного газа и некоторым вопросам, связанным с его горением в двигателе.

В табл. 33 приводится средний состав генераторного газа и его теплотворная способность для ряда твердых топлив, включая для сопоставления наиболее характерные анализы генераторного газа из соломы, льняной костры и гуза-пай.

Таблица 33

Средний состав генераторного газа, полученный из различных твердых топлив

Топливо	Состав газа в %							H_u ккал/м ³
	CO	H ₂	CH ₄	C _n H _m	O ₂	CO ₂	N ₂	
Древесные чурки	19,5	16,3	2,5	—	1,7	9,8	50,2	1224
То же	20,7	18,6	1,7	—	—	10,5	48,5	1249
Швырок	17,0	9,25	4,3	—	0,2	11,0	58,25	1132
Щепа	22,0	16,5	1,4	—	1,0	13,0	47,1	1214
Древесный уголь	28,7	4,6	1,8	—	—	2,5	62,3	1142
Торф малозольный	20,3	16,5	1,85	0,26	0,76	9,6	45,7	1220
Солома озимая	15,1	13,0	5,3	0,51	0,4	13,6	52,09	1302
То же	16,4	9,7	7,3	1,05	0,4	16,0	49,05	1525
"	21,2	15,8	2,92	—	0,93	13,1	46,05	1337
Костра	17,7	16,9	4,9	0,92	0,7	13,1	46,72	1525
Гуза-пай	25,58	6,67	1,13	0,12	—	4,76	52,36	1164

Ознакомление с данными табл. 33 приводит к выводу о том, что наибольшей теплотворной способностью обладает генераторный газ, полученный в результате газификации растительных отходов (солома, костра, гуза-паи). Из табл. 33 отчетливо видно повышенное содержание в составе генераторного газа из растительных отходов метана, который оказывает влияние на повышение теплотворной способности газа.

Процесс, разработанный для газификации соломы, вообще характерен повышенным содержанием в газе водородной группы, благодаря своеобразно протекающим реакциям крекинга смол в протоках «воздушной решетки».

При соответствующем управлении процессом удавалось временами получать газ с теплотворной способностью до 3345 ккал/м³ (непрерывное рыхление коксовой подушки с частичным сбросом нижних слоев в зольник) следующего состава: CO₂ — 12,0%; CO — 19,0%; O₂ — 2,4%; H₂ — 12%; C_nH_m — 0,75%; C₂H₆ — 10,7%; C₃H₈ — 9,6%. Пламя горящего факела этого газа отличалось ярко оранжевой расцветкой без признаков копоти.

Метан, на котором мы здесь останавливаемся подробнее, является первым членом гомологического ряда предельных алифатических углеводородов, называемых также парафинами и отвечающих общей формуле C_nH_{2n+2}.

Отсутствие в нем связи C—C отличает его от высших членов ряда; он более устойчивый и инертный углеводород. Температура его разложения на 200° С выше температуры разложения этана, в то время как разность между соответствующими температурами для отдельных членов ряда около 25° С.

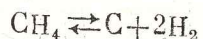
Физические параметры метана

Молекулярный вес <i>M</i>	16,031
Газовая постоянная <i>R</i>	53,0 кг м ³ /м ² кг°С
Критический объем <i>V</i> _{кр}	61,728 см ³ /г
Удельный вес газа <i>γ</i>	0,7168 кг/м ³
Истинная теплоемкость газа <i>C_p</i>	0,5294 ккал/кг°С

Температура начала распада метана зависит от условий протекания процесса.

В контакте с некаталитическими веществами, т. е. примерно в условиях генераторного процесса, метан изменяется при 650—700°.

Одна из первых схем термического разложения метана представляется следующим уравнением:

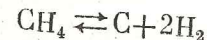


Однако образование угля и водорода по этому уравнению не является единственным типом реакции, отображающим подлинный механизм распада. Варьируя условиями реакции, можно получать, наряду с углеродом и водородом, другие продукты, что свидетельствует о достаточно сложном механизме этого процесса.

Исследования показывают, что без катализатора практически

невозможно достигнуть состояния равновесия указанной выше реакции.

Аналитически представляется возможным следующим образом представить уравнение для равновесия реакции



$$\lg K_p = \frac{4,583}{T} - 1,75 \lg T + 0,000630 \cdot T - 0,7 \text{ (для аморфного углерода)}$$

$$\lg K = \frac{4,008}{T} - 1,75 \lg T + 0,000630T - 0,7 \text{ (для графита)}$$

В связи с изложенным возникают вопросы, какой из компонентов генераторного газа обладает лучшими моторными качествами в рабочей смеси? Какая направленность газификационного процесса растительных отходов в этом случае может быть признана наиболее эффективной?

В табл. 34 мы приводим теплотворную способность рабочих смесей горючих компонентов генераторного газа с воздухом.

Таблица 34

Теплотворная способность рабочих смесей компонентов генераторного газа с воздухом

Наименование газа	Низшая теплотворная способность газа при 0° и 760 мм рт. ст. H ₂	Теоретически необходим. колич. воздуха для сгорания 1 м ³ газа	Теплотворная способность рабочей смеси H ₂			
			α=1,0	α=1,2	α=1,4	α=1,6
Окись углерода	3 045	2,38	900	796	700	630
Водород	2 580	2,38	763	678	593	535
Метан	8 590	9,52	816	690	595	526
Этилен	14 300	14,28	936	798	682	587

Из табл. 34 следует, что если бы рабочая смесь состояла из одного однородного газа и воздуха, то CO являлась бы наиболее выгодным компонентом, причем при всех значениях α смесь CO с воздухом имеет большую теплотворную способность.

Однако следует здесь же отметить, что разница между тепловыми зарядами метано-воздушной и водородо-воздушной смеси с увеличением α уменьшается.

Практически генераторный газ является газом не однородным, а состоящим из смеси различных компонентов, причем содержание горючей части в газе не превышает 40%, остальная часть приходится на инертные газы — азот и углекислоту.

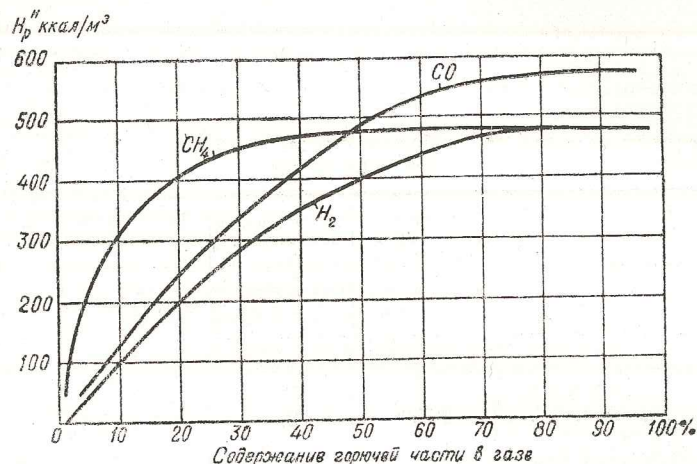
Если представить себе смесь, состоящую из инертных газов одного горючего компонента и воздуха, то порядок, показанный в табл. 34, может измениться, что можно видеть из фиг. 14 и табл. 35.

Изменение теплотворной способности смеси в зависимости от содержания горючей части в газе, приведенное на фиг. 14, показывает, что в случае присутствия инертных газов до 50—60% наи-

Таблица 35

Теплотворная способность 1 м³ горючей смеси для случая, когда объем горючего газа до смешения с воздухом составляет 20%, а инертного газа—80%

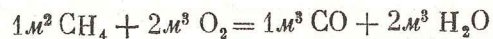
Горючий компонент смеси	H_u , ккал/м ³	L_0	H_D , ккал/м ³
Метан	1724	1,904	590
Окись углерода	605	0,476	510
Водород	514	0,476	348



Фиг. 14. Изменение теплотворной способности газовой смеси в зависимости от содержания горючей части в газе при $\alpha = 1,5$.

большой теплотворной способностью будет обладать метано-воздушная смесь. Второе преимущество метана заключается в том, что он обладает наибольшим коэффициентом молекулярного изменения.

Процесс сгорания метана происходит, как известно, следующим образом:

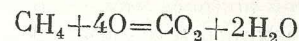


Как видно, объем газов до и после сгорания здесь одинаков, т. е. коэффициент молекулярного изменения $\beta = 1$.

Известно, что коэффициент молекулярного изменения без учета влияния остаточных газов выражается следующим образом:

$$\beta = \frac{M''}{M'}$$

где M'' — количество продуктов сгорания в молях;
 M' — количество заряда до сгорания в молях.
 Для метана получаем:



$$16 \text{ кг} + 64 \text{ кг} = 44 \text{ кг} + 36 \text{ кг}$$

$$1 \text{ моль} + 2 \text{ моля} = 1 \text{ моль} + 2 \text{ моля},$$

откуда:

$$\beta = \frac{3 + \frac{2}{0,21} \cdot 0,79}{1 + \frac{2}{0,21}} = \frac{3 + 7,52}{1 + 9,52} = 1,0.$$

Величина среднего индикаторного давления для двигателей, работающих по циклу Отто, равна:

$$P_i = \frac{P_c}{\Sigma - 1} \left[\frac{P_z}{P_c} \cdot \frac{1 - \frac{1}{\Sigma^{n_2 - 1}}}{n_2 - 1} - \frac{1 - \frac{1}{\Sigma^{n_1 - 1}}}{n_1 - 1} \right].$$

При сгорании по циклу Отто рабочей смеси по изохоре давление конца сгорания

$$P_z = \beta P_c \frac{T_z}{T_c},$$

где β — коэффициент молекулярного изменения;
 P_c и T_c — давление и температура конца сжатия;
 T_z — температура конца сгорания.

Таким образом, величина P_z определяет среднее индикаторное давление P_i , которое повышается с ростом коэффициента молекулярного изменения.

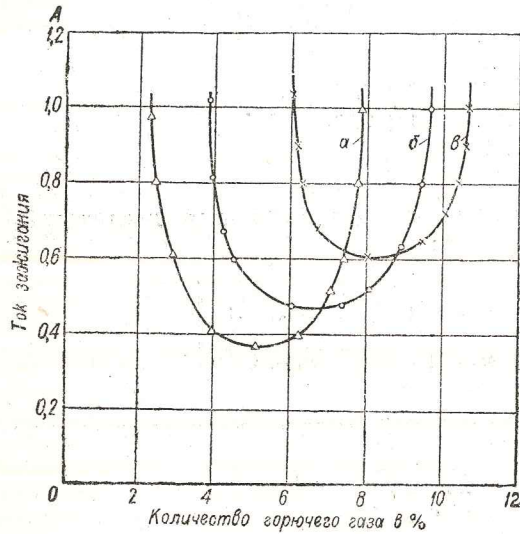
Наряду с другими обстоятельствами, эффективность работы газового двигателя во многом зависит от воспламеняемости газовой смеси, которой заполняются рабочие цилиндры двигателя.

Известно, что смеси, состоящие из одних и тех же составляющих, но взятых в различных пропорциях, требуют различной тепловой энергии для их воспламенения. В связи с этим представляют практический интерес пределы воспламенения — минимумы — для смесей различных углеводородов с воздухом при нормальных атмосферных условиях, приведенных на фиг. 15.

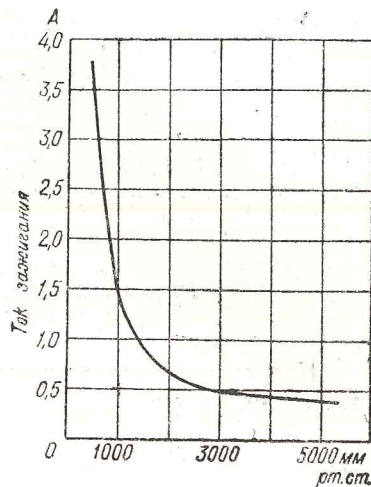
Нетрудно заметить, что эти пределы воспламенения довольно характерны и сильно меняются с природой газов. В то время, когда нижний предел воспламенения имеют все горючие газы, верхний предел для некоторых газов еще не найден. В табл. 36 приведены нижние и верхние пределы воспламенения для отдельных составляющих генераторный газ и газов: водяного, коксового и доменного.

Из данных табл. 36 нетрудно заметить, что среди отдельных газов метан по нижнему пределу воспламенения занимает среднее положение, несколько уступая этану.

Здесь вполне уместен вопрос, может ли воспламениться газовая смесь, лежащая вне верхнего или нижнего пределов своей воспламеняемости. Опыт показывает, что действительно смесь, лежащая вне пределов воспламенения, может быть зажжена, но она неспособна давать устойчивое пламя.



Фиг. 15. Пределы воспламенения для смесей различных углеводородов с воздухом: а — пропан, б — этан, в — метан.



Фиг. 16. Влияние увеличения сжатия газа на его горючесть (газ — смесь 9,5% метана с воздухом)

Другими факторами, влияющими на пределы воспламенения газовой смеси, являются температура, давление и турбулентность.

Пределы воспламенения газов

Таблица 36

Название газа	Нижний предел воспламенения	Верхний предел воспламенения
	в объемных процентах	
Водород	4,1	74
Оксид углерода	12,5	74
Метан	5,3	14
Этан	3,2	12,5
Водяной газ	6,9	55—70
Натуральный газ	4,8	13,5
Коксовый газ	5,3	31
Доменный газ	—	75

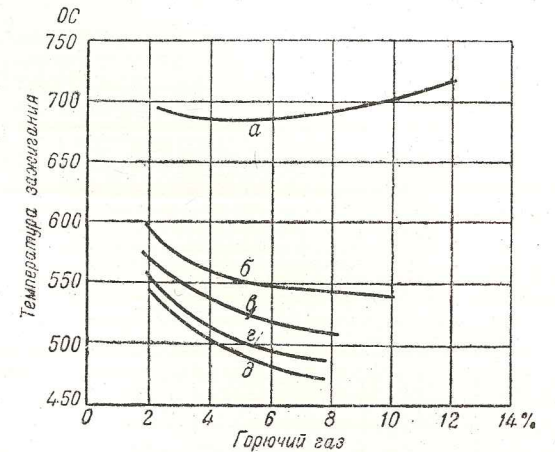
Среди этих факторов для нас практический интерес представляет вопрос о воспламеняемости газовой смеси с повышением давления, т. е. случай, как раз имеющий место при повышении степени сжатия двигателя.

На фиг. 16 приведена кривая, полученная для 9,5% смеси метана с воздухом, показывающая связь между энергией минимальной искры, вызывающей зажигание, и начальным давлением зажигаемой смеси.

Из характера приведенной кривой можно сделать важное заключение, показывающее, что с увеличением сжатия (давления) значительно возрастает горючесть газов.

В табл. 37 приведены данные, показывающие влияние давления на температуру зажигания для водорода и метана.

Из этих данных нетрудно прийти к заключению о том, что температура зажигания газовой смеси зависит от давления, и увеличение давления выше атмосферного обычно сопровождается уменьшением температуры зажигания.



Фиг. 17. Температура зажигания различных углеводородов: а — метана, б — этана, в — пропана, г — бутана, д — пентана.

Вместе с тем, на температуру зажигания существенное влияние оказывает состав газовой смеси. Так из приведенных на фиг. 17 температур зажигания типичных углеводородов наиболее высокие температуры требуются для метана и этана.

С точки зрения условий работы двигателя повышенное содержание метана в генераторном газе из растительных отходов следует рассматривать как явление положительное и в случае работы на смесях с одинаковой теплотворной способностью, смесь с большим

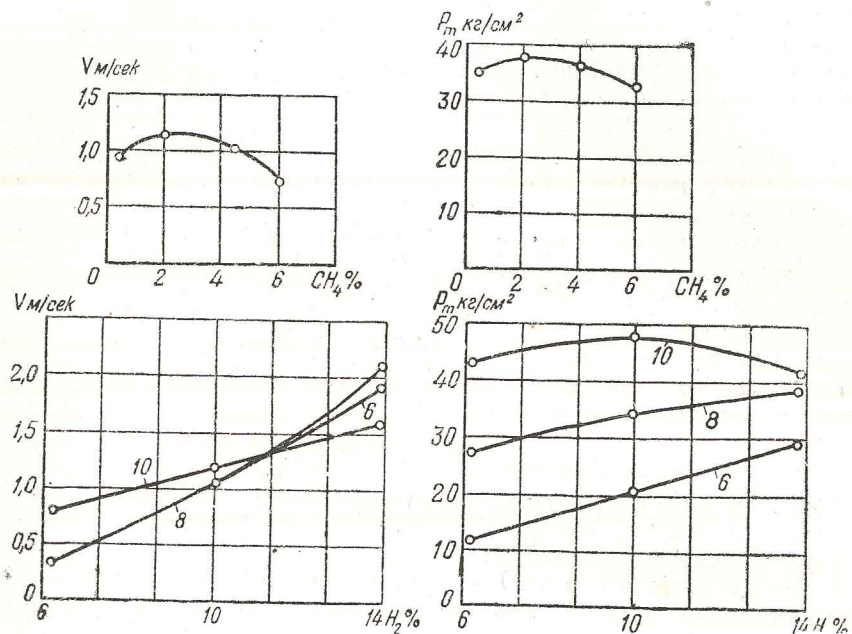
Таблица 37

Влияние давления на температуру зажигания для водорода и метана

Газ в смеси с воздухом	Время в сек.	Температура зажигания в °С при давлении в атм				
		1	2	3	5	7
Водород	0,5	630	628	624	678	611
Метан	0,6	746	—	705	675	653

содержанием CH_4 обеспечивает двигателю большую мощность. Однако повышенный выход CH_4 обычно сопровождается снижением содержания CO и H_2 и ведет к снижению теплотворной способности газа.

Таким образом, практически не следует стремиться к увеличению содержания метана за счет сокращения CO и H_2 , имея в виду, что эти газы содержат в себе почти весь запас скрытой химической энергии генераторного газа. При среднем содержании метана в генераторном газе из растительных отходов в пределах 2,5—3,5% состав остальных компонентов мало отличается от генераторных газов из древесины и торфа.



Фиг. 18. Влияние присадок в генераторный газ CH_4 и H_2 на параметры горения P_o , P_m и $\alpha_{\frac{1}{2}}$

Исследования, проведенные в автоклаве в целях установления зависимости между составом генераторного газа и процессами, происходящими при сгорании генераторного газа, привели к некоторым интересным данным, касающимся скорости сгорания и давления сгорания генераторного газа различного состава.

В генераторном газе состава (по объему): CO_2 — 5%; CO — 27%; H_2 — 10%; CH_4 — 1%; O_2 — 0% и N_2 — остальное, изменялось содержание метана, водорода, окиси углерода и углекислоты. Кроме того, внутри каждой группы опытов менялся коэффициент избытка воздуха и задавались различные давления, предшествующие подаче запальной искры.]

Скорость горения определялась исходя из условно принятого положения, что к моменту максимального давления взрыва пламя доходило до днища бомбы; зная расстояние от точки запала до

днища бомбы и время от момента запала до момента наибольшего давления, легко можно подсчитать и скорость.

Результаты опытов с присадкой в генераторный газ отдельно метана и водорода приведены на фиг. 18. Оказывается, что присадка этих двух компонентов приводит как к увеличению скорости сгорания, так и увеличению давления взрыва. Отсюда следует предположить, что такое изменение состава газа, оказывая прямое влияние на скорость горения и величину давления, может сказаться на показателях индикаторной диаграммы и работе двигателя в целом.

В связи с этим, на полноту индикаторной диаграммы существенное влияние оказывает угол опережения зажигания, использование которого при эксплуатации газовых двигателей является обязательным.

Активизируемое таким способом в известных границах «вялое» сгорание газоздушных смесей находит объяснение в работах советских исследователей проф. Соколика и Щелкина. При анализе процессов в двигателе с точки зрения теории горения одним из важных вопросов является скорость горения при нормальной работе двигателя.

Исследование под таким углом зрения индикаторных диаграмм показывает, что в случае изменения в широких пределах числа оборотов двигателя — часть рабочего цикла, занятая процессом сгорания, меняется сравнительно мало.

Таким образом, скорость сгорания должна сильно возрастать с увеличением числа оборотов двигателя и приблизительно должна быть пропорциональна числу оборотов, что может быть объяснимо турбулентным характером горения. В этом случае скорость горения должна быть пропорциональна пульсационной скорости, характеризующей интенсивность турбулентного движения горючей смеси.

Однако в бедных горючих смесях, к каковым относится газоздушная смесь генераторного газа, процесс сгорания сильно затягивается, что как будто бы противоречит представлению о турбулентном горении, при котором скорость сгорания не должна была бы зависеть от состава смеси.

Проф. Соколик и Щелкин следующим образом объясняют этот вопрос. Процесс сгорания в двигателе, по их представлению, делится на две стадии. В первой стадии, после зажигания, пока размер образовавшегося очага горения меньше масштаба турбулентности, скорость сгорания определяется фундаментальной скоростью распространения пламени и не зависит от турбулентности. Вот эта стадия процесса сгорания, по их воззрению, и растягивается в медленно и «вяло» горящих бедных горючих смесях. После того, как размер очага горения сделался больше масштаба турбулентности, горение приобретает турбулентный характер, и скорость сгорания в этой стадии пропорциональна числу оборотов.

В быстро горящих смесях продолжительность первой стадии становится настолько малой, что весь процесс сгорания ускоряется примерно пропорционально числу оборотов.

Приведенные нами выше результаты исследования в автоклаве с целью установления зависимостей между составом генераторного

газа и процессами, происходящими при его сгорании, показывают на увеличение скорости сгорания при присадке в генераторный газ метана. Связывая эти наблюдения с выводами проф. Соколика и Щелкина, можно с большим основанием предположить, что увеличение метана в составе газовой смеси способствует сокращению первой стадии ее сгорания в камере сжатия двигателя и приводит, таким образом, к ускорению всего процесса сгорания в целом.

ВЫВОДЫ

Краткое рассмотрение главных вопросов, определивших содержание изложенной работы и посвященных балансу растительных отходов и их классификации, установлению газификационных характеристик растительных отходов и моторных свойств получаемого в результате их газификации силового газа дает возможность следующим образом сформулировать основные выводы:

1. Среди различного вида твердых топлив, входящих в топливно-энергетический баланс Советского Союза, растительным отходам отводится довольно скромное место, в то время когда даже сравнительно неполный учет этих отходов показывает, что мы по существу имеем дело с крупными запасами, позволяющими рассматривать их как серьезную местную топливно-сырьевую базу.
2. Растительные отходы характерны своей ежегодной возобновляемостью, что определяет высокую степень устойчивости запасов этих горючих отходов и непрерывность использования их во времени.
3. Особо важное значение растительные отходы приобретают как местное твердое топливо для сельского хозяйства. С точки зрения увеличения в сельском хозяйстве источников механической энергии наиболее целесообразным методом энергетического использования растительных горючих отходов является их газификация на силовой газ с последующим его применением в качестве моторного топлива в двигателях внутреннего сгорания.
4. Разработанная автором классификация растительных отходов впервые дает возможность распределить эти отходы по видам, зависящим от биологических особенностей растений и методов их предварительной обработки и переработки. Положенная в основу классификации зернистость отходов является исключительно важной особенностью, оправдываемой не только биологическим характером растительных отходов, но и тем обстоятельством, что зернистость топлива является важнейшей его газификационной характеристикой.
5. Общее количество горючих растительных отходов, представленное всеми классами предложенной нами классификации, составит в 1950 г. 51,73 млн. т ежегодно возобновляемого условного топлива.
6. Рассмотрение указанных запасов по отдельным растениеводческим зонам показывает, что почти в каждой зоне сельское хозяйство в состоянии обеспечить такое их количество, которое, наряду с использованием других местных энергетических ресурсов, в сумме

будет достаточно для удовлетворения нужд механизации его производства.

7. Общие теплотехнические свойства горючих растительных отходов близки по показателям к древесной (в обычном смысле этого понятия) растительности, а по теплотворной способности в некоторых случаях и превышают ее.

8. Растительные отходы обладают характерными газификационными характеристиками, определяемыми биологией растения, условиями произрастания, климатом, почвой и технологией первичной или вторичной их обработки и переработки. Главнейшими из этих свойств являются: малый насыпной вес, неравноплотность слоя в объеме, малая реактивная поверхность для стеблевидных топлив и необычайно сильно развитая для топлив типа костры, крупная шелуха и других высокая битуминозность, высокая гигроскопичность и, наконец, низкая термическая устойчивость золы.

9. Рядом простейших технологических приемов (резка, прессование, сушка) удастся значительно повысить газификационные характеристики растительных отходов и таким образом значительно повысить качество этих отходов как высокоэффективного генераторного топлива.

10. Моторные свойства генераторного газа из растительных отходов по общим показателям можно признать равноценными с газами, получаемыми при газификации других твердых топлив.

Химический состав генераторного газа колеблется в зависимости от вида топлива и условий газификации, причем каждый из горючих компонентов в той или иной мере влияет на характер работы двигателя.

11. Генераторный газ, получаемый в результате газификации твердого топлива, следует считать в народном хозяйстве СССР важнейшим видом заменителя жидкого моторного топлива для двигателей внутреннего сгорания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зенкис Л. С., Методика составления топливного баланса СССР, Машгиз, 1937.
2. Энергетические ресурсы СССР, Акад. Наук СССР, 1937.
3. Чернышев А. Б., О газогенераторном хозяйстве СССР, «Плановое хозяйство» № 11, Госпланиздат, 1939.
4. Закон о пятилетнем плане восстановления и развития народного хозяйства СССР на 1946—50 гг., Госполитиздат.
5. Богданов Н., Сельскохозяйственное машиностроение и машиноснабжение советской деревни, Госиздат, 1928.
6. Демидов С., Восстановление и развитие сельского хозяйства в новой пятилетке, «Плановое хозяйство» № 2, Госпланиздат, 1946.
7. Власов А. С., Экономика электрофицированного колхоза, Сельхозгиз, 1947.
8. Вильямс В. Р., Основные свойства топлив и способы их определения, Госиздат, М. Л. 1924.
9. Берг Л. С., Географические зоны Советского Союза Акад. Наук СССР, 1947.
10. Майсурян Н. А., Растениеводство, Сельхозгиз, 1946.
11. Тагеев Д. Л., Использование отходов древесины с.-х. культур и торфа в газогенераторах, «Теплосиловое хозяйство» № 9, 1940.
12. Коллеров Л. К., Солома, как топливо для газогенераторов, «Механизация и электрификация сельского хозяйства» № 10, 1938.
13. Витт К. А., Соломенные экзобрикеты, Труды НИМИС, 1946.
14. Есипов И. Д., Брикеты из соломы для автотранспортных газогенераторов, Труды НИМИС, 1946.
15. Исследование процессов горения натурального топлива. Под редакцией Г. Ф. Кнорре.
16. Шишаков Н. В., Основы производства горючих газов, Энергоиздат, 1948.
17. Общая химическая технология топлива, Госхимиздат, 1947.
18. Карелин А. И., Состав и качество топлив СССР, ТЭП Госполитиздат, 1940.
19. Линчевский В. П., Топливо и его сжигание, Metallurgizdat, 1947.
20. Чуханов Э. Ф., К вопросу о теории горения и газификации твердых топлив, Акад. Наук, 1938.
21. Козлов В. Н., Производство и переработка древесной смолы на смазочные масла и горючие продукты, Гослестехиздат, 1947.
22. Гинзбург Д. Б., Газогенераторы и газовое хозяйство в стекольной и керамической промышленности, Промстройиздат, 1949.

23. Мазинг Е. К. О силовом газе для двигателей внутреннего сгорания, «Известия Всесоюзного Тепл. института» № 2, 1924.
24. Перспективы развития топлива и двигателей, «Автомобильная промышленность», Машгиз № 7—8, 1946.
25. Иноземцев Н. В., Тепловые двигатели, Машгиз, 1945.
26. Окнов М. Г., Топливо и его сжигание, Энергоиздат, 1930.
27. Михельсон Н. С., О нормальной скорости воспламенения гремучих газов, 1890.
28. Фрост М. М., Термодинамика реакций углеводородов «Химия твердого топлива», 1933.
29. Шретер В. М., Условия горения, Энергоиздат, 1930.
30. Соколик А. С. Горение и детонация в газах, ГТТИ, 1934.
31. Морган Д., Принципы зажигания, Машгиз, 1947.
32. Льюис Б. и Эльбе, Г., Горение, пламя и взрывы в газах, ГИЗ, 1948.
33. Соколик А. С., Проблемы кинетики катализа, Успехи химии, 1938.
34. Иноземцев Н. В. и Кошкин В. К., Процессы сгорания в двигателях, Машгиз, 1949.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
1. Классификация растительных отходов	5
2. Краткие сведения о балансе растительных отходов в СССР и его зональном делении	8
3. Биологические особенности и общие теплотехнические свойства растительных отходов	14
Хлебные злаки	14
Лен	21
Ковошля	22
Кукуруза	23
Подсолнечник	24
Хлопчатник	27
Камыш озерный	30
Тростник	31
Разные растительные отходы	31
4. Газификационные характеристики растительных отходов	33
Показатели газификации основных групп твердого топлива	34
Общие свойства растительных отходов, как газогенераторного топлива	36
5. Моторные свойства генераторного газа из растительных отходов	47
Выводы	62
Литература	64

Технический редактор *Р. Г. Польская* Корректоры *В. С. Христофорова*
и *Е. С. Кушлю*

Подписано к печати 22/V 1950 г. М 18775. Печ. л. 4¹/₄ + 3 вкл.
Уч.- изд. листов 5. Тираж 2000. Зак. № 1582.

1-я типография Машгиза, Ленинград, ул. Моисеенко, 10

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ДИЗЕЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ

НА СКЛАДЕ ИНСТИТУТА ИМЕЮТСЯ

Книга 1. Иностранная техника в дизелестроении

- Н. А. АНДРЕЕВСКИЙ** — Тенденции развития дизельной топливной аппаратуры (обзор современных конструкций и патентной литературы).
Н. Н. ИВАНЧЕНКО — Немецкие двигатели M6V 40/46 КВВ и M9V 40/46 СВ конструкции фирмы MAN для подводных лодок.
М. И. ЛЕВИН и **Н. Ф. МОРОЗОВ** — Аппаратура автоматизированных дизельных установок.

Объем 6 п. л. Цена 7 руб. 1947 г.

Книга 2. Дизелестроение

- Н. Н. ИВАНЧЕНКО** — Основные расчетные и конструктивные параметры двигателей дизеля конструкции Научно-исследовательского дизельного института.
Л. В. ГЕНДЛЕР — О критерии быстроходности двигателей внутреннего сгорания.
Г. И. КОБЫЛЯНСКИЙ — Применение литых коленчатых валов в дизелестроении.
З. М. МИНКИН — Об общих приемах или способах регулировки двигателей в процессе их доводки.
А. К. БОГДАНОВ — Из опыта производства и ремонта прецизионных деталей топливной аппаратуры двигателей дизеля.

Объем 10¹/₄ п. л. Цена 15 руб. 1947 г.

Книга 3

- Л. Я. ВОЛЧОК** — Свайные молоты и дорожные трамбовки внутреннего сгорания.

Объем 7¹/₄ п. л. Цена 9 руб. 1947 г.

Книга 5. Исследование рабочих процессов в дизелях

- Н. А. АНДРЕЕВСКИЙ** и **А. А. ФАДИН** — Экспериментальное исследование работы и расчет насос-форсунки дизеля Джeneral Моторс 278-А.
О. С. АМЕЛЬКИН — Применение камер сгорания вихревого типа в быстроходных двигателях конструкции НИДИ.
Л. В. ГЕНДЛЕР — Проектирование кулачков для клапанных приводов быстроходных дизелей.

Объем 7 п. л. Цена 8 р. 60 к. 1948 г.

Книга 6. Регулирование и автоматизация в современных дизельных установках

- А. М. КАЦ** — Новые конструкции прецизионных регуляторов импортных дизелей.
М. И. ЛЕВИН и **Н. Ф. МОРОЗОВ** — Вопросы автоматизации дизельных установок.

Объем 11 п. л. Цена 7 р. 50 к. 1948 г.

Заявки направлять по адресу — Ленинград, 14, Парадная ул.,
д. № 8, Центральный Научно-исследовательский дизельный институт