В. А. ЛЯМИН

ГАЗИФИКАЦИЯ ДРЕВЕСИНЫ

ИЗДАТЕЛЬСТВО
«ЛЕСНАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ»
Москва 1967

ВВЕДЕНИЕ

Древесные отходы лесозаготовительных и деревообрабатывающих предприятий в большинстве случаев не используются [1], [2].

Между тем, древесина создается в природе в процессе длительных и сложных физико-химических и биологических превращений и представляет собой огромное богатство.

В среднем по Союзу из того, что заготовлено в лесу, полезно используется примерно 35—40%; остальная часть в виде сучьев, вершин, неликвидных дров, горбылей, реек, опилок, стружек, обрезков и т. п., как правило, пропадает.

Использование отходов в качестве топлива (например, для лесозаготовительного предприятия) далеко не решает проблему полной утилизации этой древесины [3].

Древесные отходы некоторых деревообрабатывающих предприятий более высокого качества намечают использовать для получения технологической щепы в целлюлозном, картонном, гидролизном производствах, а также для производства стружечных и волокнистых плит [1]. Но переработка лесозаготовительных древесных отходов по указанным направлениям в ряде случаев не может быть рекомендована ввиду их низкого качества и малых масштабов сырьевой базы. Характерной особенностью отходов лесозаготовительных предприятий является то, что этот вид сырья рассредоточен и скапливается в отдельных производственных точках в небольших количествах. Так, в Ленинградской обл. число леспромхозов, имеющих древесных отходов 5—10 тыс. *пл. м*^{3}*/год*, составляет 34%; 10—20 тыс. — 27%; 20—40 тыс. — 24% и 40—100 тыс. — 15%. Из всего количества древесных отходов на долю мелких и средних сырьевых точек приходится 80% неликвидного древесного сырья.

Отходы лесозаготовительного процесса намечается использовать методом газификации с целью получения топливного газа как заменителя древесного топлива для основного производства и кислой смолы (полуфабриката), переработка которой должна производиться на специальных лесохимических заводах.

Применение древесины в качестве топлива для газогенераторов практиковалось на заводах России и за рубежом с давних

времен. Газогенераторы потребляли древесину в виде поленьев (швырка). Основная цель газификации заключалась в том, чтобы получить газ для сжигания его в сталеплавильных, нагревательных, стекольных и других печах [4].

Древесное топливо по сравнению с другими является самым дорогим. По этой причине дрова для газогенераторов заменяют твердым топливом, а иногда жидким горючим или природным газом. Но газификация древесины может быть экономически оправданной при условии применения вместо дорогостоящих дров дешевых древесных отходов, с одной стороны, и, с другой, достижением высоких выходов жидких продуктов с последующим получением из них разнообразных и нужных народному хозяйству лесохимикатов.

Такое направление газификации древесины, названное энергохимическим, впервые было освоено в СССР в 1933—1935 гг.

В газогенераторе древесина неизбежно нагревается в атмосфере газа, не содержащего свободного кислорода, что приводит к образованию смолы, кислот, древесного спирта и других жидких продуктов. Исследования показали, что при газификации, например, еловых дров, выход основных лесохимикатов почти такой же, как и при сухой перегонке ее в ретортах.

Для нормального течения процесса газификации дров необходимо, чтобы они были относительно сухими ($W=20\div25\%$), а время пребывания дров в шахте должно быть около 25—30 *ч*. Соблюдение таких же параметров требуется для завершения процесса сухой перегонки дров в ретортах [5].

Показатели по производительности газогенератора и по выходам резко изменяются, если газифицируемую древесину превратить в щепу. Измельчение древесины и последующая подача щепы в газогенератор могут быть легко механизированы. Удельные затраты труда и производительность объема газогенератора при использовании щепы по сравнению с дровами получаются более благоприятные. Так, средняя удельная производительность промышленного газогенератора, перерабатывающего дрова (швырок), составляет 210 *пл. м*^{3}/*м*^{3} в год, а перерабатывающего щепу — 1200 *пл. м*^{3}/*м*^{3}. Затраты труда на обслуживание газогенераторов соответственно равны 0,7 и 0,23 *чел.-ч/пл. м*^{3}.

Решать проблему энергохимической переработки древесных отходов в отрыве от основного (лесозаготовительного или деревообрабатывающего) производства, а также от других технологических решений, направленных к использованию отходов, нельзя. Переработка отходов методом газификации представляет собой не утилизацию отходов, а такую же операцию, как, скажем, лесопиление и сушка пиломатериалов в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах.

На современных лесозаготовительных предприятиях, примыкающих к железным дорогам, практикуется не только разделка

хлыстов, но и лесопиление, шпалопиление и др. В связи с этим на нижних складах леспромхозов концентрируются неликвидные дрова-долготье, отходы, образующиеся при разделке хлыстов, а также отходы от лесопиления и других операций механической переработки древесины. В некоторых случаях на нижних складах концентрируются отходы от лесозаготовок (сучья и вершины).

Вывозка из леса заготовленной древесины в хлыстах и с кроной, организация разделки их в одном месте, частичная переработка дров (например, на тарную дощечку) повышают выход деловой древесины. Однако количество неиспользованных отходов остается еще огромным. Направления и методы использования этих отходов в лесозаготовительном или деревообрабатывающем производстве зависят от количества и качества отходов, условий сбыта продукции, наличия дешевых источников электроэнергии и других факторов. При энергохимической переработке можно утилизировать отходы, которые не могут быть использованы по другим направлениям, включая производство древесных плит, картона и т. п. Газификация так же, как и сжигание в топках, позволит полностью использовать заготавливаемую предприятием древесину, при этом не будет сточных вод, не потребуется больших капиталовложений и значительных трудозатрат на обслуживание оборудования. Экономичность этого производства достигается при соблюдении достаточного масштаба производства и организации переработки отходов в комплексе с другими производствами (производство хвойной муки и других продуктов из хвои, производство канифольных продуктов, сушильный процесс с использованием генераторного газа и др.) [6].

Перспективным способом использования отходов является их энергохимическая переработка для получения электроэнергии или пара и химических продуктов термолиза в виде сырой кислой смолы (суммарного конденсата) [7], [8].

Исследования газогенераторного процесса на древесине показали, что удельный выход жидких продуктов и газа можно регулировать, меняя режим работы газогенератора. Например, от веса абс. сух. древесины можно получить до 40% жидких органических продуктов.

Исследованиями, проводимыми в ЛТА им. С. М. Кирова и в ЦНИЛХИ под руководством проф. Д. В. Тищенко, установлено, что смолы, получаемые при пиролизе древесины, могут быть использованы для производства лесохимических продуктов (клеев для древесины, дубителей, гербицидов, литейных крепителей, уксусной кислоты и др.).

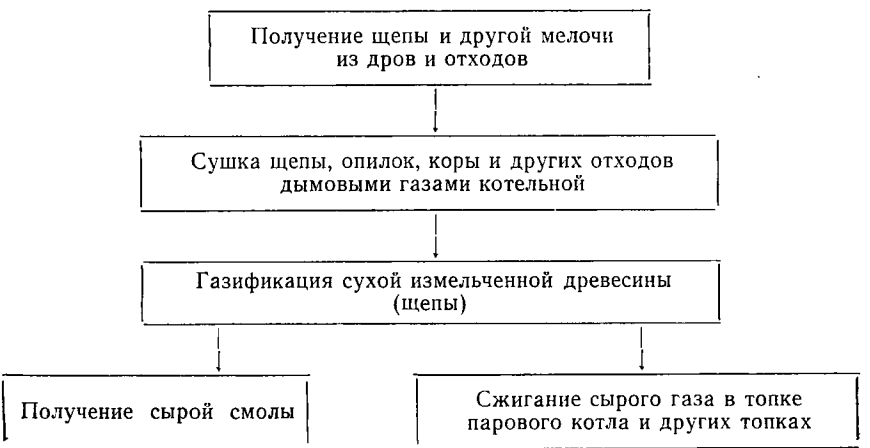
Получение смолы в промышленной топке Померанцева на заводе «Вахтан» осуществляется из сухой отработанной канифольноэкстракционной щепы с добавкой к ней 40% обычной

щепы [8]. Намечается широкое внедрение топок по схеме энергохимического комплекса на древесном топливе с исходной влажностью 40—50%.

Развитие промышленности сухой перегонки древесины диктуется необходимостью получения древесного угля. Поэтому рост выработки сухоперегонной древесной смолы будет соответствовать росту производства древесного угля.

Одним из надежных и проверенных на практике способов получения древесной смолы является газификация щепы. На основе более чем 30-летней эксплуатации газовой станции Ижевского завода выход смолы от веса абс. сух. щепы можно принять 12% (7% отстойной смолы и 5% растворимой). Ряд лет на древесных газовых станциях значительная часть главным образом растворимой смолы сбрасывалась со сточными водами в водоемы. Однако, как показала практика, можно осуществить газификацию древесины без сточных вод.

Для этого энергохимическую переработку древесных отходов и дров предусматривается организовать следующим образом:



По опыту Амзинского завода газогенераторные конденсаты, получаемые по этой схеме, могут быть использованы на действующих лесохимических заводах, на которых производится сухая перегонка древесины и переработка сухоперегонных конденсатов, аналогичных по составу газогенераторным. Лесохимические заводы, как правило, обеспечены квалифицированными кадрами технологов, что облегчает задачу освоения нового производства. Суммарный газогенераторный конденсат необходимо возить в железнодорожных цистернах от мест их получения (нижних складов леспромхозов, деревообрабатывающих заводов и др.) на лесохимические заводы.

Кроме действующих сухоперегонных заводов, запроектировано строительство заводов сухой перегонки дерева для Западной Сибири и Урала. На некоторых из них намечается переработка газогенераторных конденсатов в небольшом количестве. На заводах создаются ГГУ, как вспомогательные цеха.

Между тем, на всех строящихся и вновь проектируемых предприятиях следовало бы организовать широкую переработку газогенераторных конденсатов.

Очевидно, что в некоторых районах Советского Союза нет надобности строить специальные смолоперерабатывающие заводы. Такое решение проблемы переработки газогенераторных конденсатов (кислой смолы) выгодно с точки зрения экономии капитальных затрат и сокращения сроков пуска и освоения цехов, вырабатывающих нужные народному хозяйству лесохимические продукты.

На севере и северо-западе Советского Союза по существу отсутствуют сухоперегонные лесохимические заводы. Поэтому в районе г. Котласа создается завод для переработки 100 тыс. *т* в год древесногенераторной смолы. Для получения такого количества смолы потребуется газифицировать на энергохимических установках до 1,5 млн. *пл. м*^{3} древесных отходов и дров.

По опыту энергохимической установки Верховского леспромхоза отстойная газогенераторная смола, получаемая при газификации лесосечных отходов хвойных пород, может быть использована в химической промышленности как мягчитель при регенерации резины. Потребность в хвойной смоле по этому направлению исчисляется несколькими десятками тысяч тонн.

К настоящему времени накоплен достаточный производственный и научный материал по газификации древесины и переработке жидких продуктов ее пиролиза. На основе имеющихся достижений можно создавать новую отрасль химической технологии древесины — энергохимическую переработку лесоотходов с получением энергии и ряда химических товаров.

В ближайшее время для производства древесногенераторной смолы наиболее целесообразно использовать сырьевые источники, находящиеся поблизости от железнодорожных путей и расположенные недалеко от действующих лесохимических заводов. Так, по предварительным данным, в радиусе 600 *км* от сухоперегонных лесохимических заводов в лесозаготовительных и деревообрабатывающих предприятиях, примыкающих к железнодорожным путям, ежегодно скапливается до 10 млн. *пл. м*^{3} неиспользуемых древесных отходов.

В современных механизированных леспромхозах средней мощности, примыкающих к железным дорогам широкой колеи, количество древесных отходов составляет 27%, в предприятиях, примыкающих к судоходным рекам, 21,3%, к рекам молевого сплава 12,5% [9].

Для удовлетворения энергетических нужд лесозаготовительного предприятия через собственную электростанцию, базирующуюся на локомобилях, может быть израсходовано при прямом сжигании всего лишь 10—25% отходов. Поэтому в ряде случаев необходимо создавать такие технологические схемы энергохимического использования древесных отходов, при которых получалось бы минимальное удельное количество электроэнергии при одновременном наибольшем выходе жидких продуктов. При газификации древесины для сушки щепы можно использовать до 40—45% генераторного газа, вырабатываемого установкой. Остальная часть этого газа должна быть направлена для получения электроэнергии, потребляемой леспромхозом и самой газогенераторной установкой. Наиболее перспективная технологическая схема обработки древесногенераторного газа предусматривает получение сырой кислой смолы примерно следующего состава: воды 30—40%, летучих кислот 7—12%, смолы 50—60%. Выход такой смолы из древесных отходов и дров около 100—120 *кг/пл. м*^{3}.

Газогенераторную установку можно в значительной степени механизировать. Основную аппаратуру и вспомогательное оборудование располагают на открытом воздухе под навесом. При этом отеплять нужно лишь некоторые детали и узлы установки, а также бытовые помещения.

Монтаж основной газовой аппаратуры под навесом целесообразен с точки зрения техники безопасности и гигиены труда. Случайные газовыделения, даже в хорошо вентилируемом здании, значительно отравляют атмосферу помещения.

Существенное сокращение объема цеховых помещений резко уменьшает общие капиталовложения.

Переработка древесных отходов методом газификации экономически оправдывается при цене древесных отходов 0,75—1 руб. за 1 *пл. м*^{3}. Энергохимическая установка производительностью 25 тыс. *пл. м*^{3} древесины в год может быть создана в леспромхозе с грузооборотом около 100 тыс. *пл. м*^{3}. Используя лесоотходы по энергохимической схеме, леспромхозы получают дешевое и удобное топливо в виде газа, например, для электростанций, для цехов, перерабатывающих, например, хвойную лапку, и др. Кроме того, на ряде предприятий будет решен большой народнохозяйственный вопрос рационального использования всей заготовленной древесины.

Энергохимическая переработка лесоотходов представляет интерес для некоторых лесопильных, мебельных, домостроительных и других комбинатов. На этих предприятиях сырой генераторный газ можно использовать не только в котельной, но и как топливо в топках газовых сушил для пиломатериалов и различных изделий.

К настоящему времени накоплен опыт эксплуатации крупных газогенераторных станций, на основе чего создано несколько небольших газогенераторных установок для различных древесных отходов, например, Амзинская (Гипролесхим), Верховская (СевНИИП), Крестецкая (ЦНИИМЭ и ЦНИЛХИ) и др.

Имеется большой производственный опытный материал по выходам газа и жидких продуктов при газификации ископаемых углей и торфов. Показатели промышленной переработки древесных отходов по существу отсутствуют.

Для того чтобы дать оценку различным древесным отходам, как сырью для газификации, в книге приведены результаты исследований газогенераторного процесса в условиях опытного стенда ЛТА им. С. М. Кирова, а также производственные и исследовательские материалы различных предприятий и институтов (ЦНИЛХИ, СевНИИП, ЛТА, Амзинского завода и др.).

Выработка силового газа из древесины по методу обращенного процесса, а также газификация древесины под давлением, например, по схеме ЛТА, использование древесных отходов в топке Померанцева и ряд других родственных вопросов не охвачены, так как по ним имеется много опубликованных материалов.

В заключение автор считает необходимым выразить благодарность А. А. Ганшину, Л. В. Гордону, В. И. Корякину, А. А. Ливеровскому, В. В. Померанцеву и В. С. Шереметьеву, а также коллективу сотрудников ЦНИЛХИ: В. Н. Гусакову, А. Н. Кислицину, И. П. Уварову, Б. Н. Филиппову, А. М. Чащину и С. Н. Юмшанову за просмотр и ценные замечания, которые были учтены при подготовке рукописи.

ГЛАВА I

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ГАЗИФИКАЦИИ ДРЕВЕСИНЫ

При газификации происходит полное превращение органической части древесины в горючий газ и жидкие продукты.

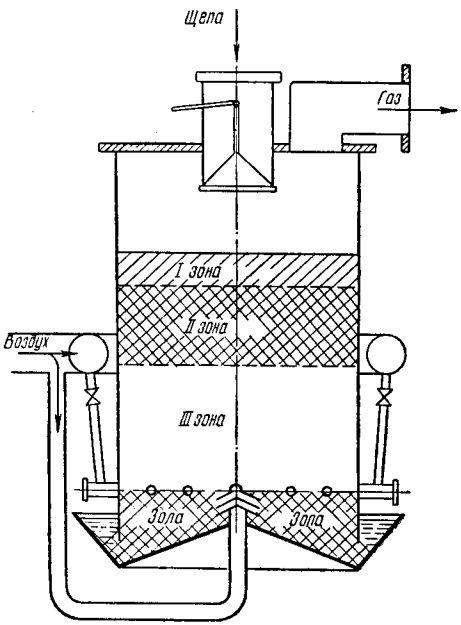


Рис. 1. Схема газогенераторного процесса

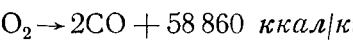
Газификация осуществляется в вертикальных шахтах, называемых газогенераторами, в которых протекает три основных процесса, условно разделяемых по зонам (рис. 1).

В верхней части шахты происходит сушка древесины (зона I), затем сухое топливо подвергается швелеванию — термическому разложению в токе нагретого газа, двигающегося от колосниковой решетки и дутьевых фурм к горловине газогенератора (зона II).

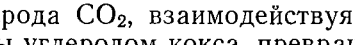
В последней зоне осуществляется процесс собственно газификации, протекающий уже не с древесиной, а с углем — продуктом швелевания древесины (зона III). Здесь происходит окисление углерода кокса (древесного угля) в атмосфере кислорода воздуха, подаваемого в газогенератор через колосниковую решетку и дутьевые фурмы. При газификации других видов твердого топлива (ископаемых углей, сланцев, кокса, торфа и др.) вместо воздушного иногда используют парокислородное или воздушное дутье, обогащенное кислородом.

1. ПРОЦЕССЫ, ПРОТЕКАЮЩИЕ ПРИ ГАЗИФИКАЦИИ ДРЕВЕСИНЫ

В зоне подачи дутья взаимодействие кислорода воздуха и углерода кокса протекает по следующим реакциям:

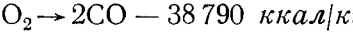


$$C + O_2 \rightarrow CO_2 + 97\,650 \text{ ккал/кг-моль}; \quad (1)$$



$$2C + O_2 \rightarrow 2CO + 58\,860 \text{ ккал/кг-моль}. \quad (2)$$

Двуокись углерода CO_2, взаимодействуя с нагретым до высокой температуры углеродом кокса, превращается в окись углерода CO



$$C + CO_2 \rightarrow 2CO - 38\,790 \text{ ккал/кг-моль}. \quad (3)$$

В результате этих процессов образуется главным образом окись углерода.

Современная теория газификации угля, основанная на исследованиях последних лет, рассматривает гетерогенную реакцию между твердым и газообразным веществами как химическое взаимодействие, происходящее на поверхности твердого тела. Количество образовавшихся продуктов зависит, с одной стороны, от реакционной способности, в данном случае древесного угля, и, с другой стороны, от скорости поступления газообразных молекул к поверхности твердого тела.

Куски угля имеют пограничный слой, через который газовые молекулы диффундируют к поверхности угля, а продукты реакции удаляются с поверхности, поступая в газовое пространство между отдельными кусками твердого тела. Интенсивность диффузионного потока зависит от ряда факторов. Если скорость химического взаимодействия между твердым телом и газовыми молекулами очень высокая, то общий результат взаимодействия между реагирующими веществами будет зависеть от интенсивности диффузионных процессов. В этом случае процесс газификации угля протекает в так называемой диффузионной области. Если скорость химической реакции между твердым телом и газовыми молекулами является решающим фактором, взаимодействие между реагирующими веществами переходит в кинетическую область процесса.

Толщина пограничного слоя зависит от ряда факторов. С увеличением скорости газа и с уменьшением размера кусков угля толщина его уменьшается.

Скорость процесса газификации в диффузионной области будет увеличиваться с повышением температуры и скорости газовых потоков. Скорость химического взаимодействия между углеродом кокса и газовыми молекулами, т. е. процесса газификации в кинетической области, также будет увеличиваться с повышением температуры. При применении высокореакционного кокса, каким является древесный уголь, скорость химической реакции возрастет еще больше, чем при газификации антрацита, бурого угля или других ископаемых топлив.

Реакционная способность различных углей характеризуется скоростью химического взаимодействия углерода с CO_2 или с водяным паром. В III зоне (зоне газификации) температура теоретически может достигать 1600°. При этом зола топлива плавится и зашлаковывает дутьевые устройства, разрушая их, что приводит к преждевременной остановке газогенератора из-за нарушения воздухоподачи. Для борьбы с этими нежелательными явлениями к воздуху, подаваемому в газогенератор, добавляют 90—200 *г/нм*^{3} водяного пара. Подача пара в дутье обеспечивает некоторое повышение калорийности газа. Дутье, искусственно увлажненное паром, в отличие от воздушного называется паровоздушным. Степень увлажнения дутья регулируется по температуре, поддерживаемой в пределах 45—60°.

Присадкой пара к дутью снижают температуру зоны собственно газификации до 1100—1200°, что уже безопасно для дутьевых устройств.

При паровоздушном дутье происходят следующие реакции:

$$C + H_2O \rightarrow CO + H_2 - 28\,300 \text{ ккал/кг-моль}; \quad (4)$$

$$C + 2H_2O \rightarrow CO_2 + 2H_2 - 17\,970 \text{ ккал/кг-моль}. \quad (5)$$

В раскаленной зоне газогенератора протекает также реакция водяного газа

$$CO + H_2O \rightleftarrows CO_2 + H_2 \pm 10\,410 \text{ ккал/кг-моль}. \quad (6)$$

Известно, что в качестве присадки к воздушному или кислородному дутью при газификации твердого топлива можно вместо пара применять двуокись углерода CO_2. Генераторные газы, полученные на таком дутье, называются регенеративными газами [10]. При получении воздушного газа выделяющееся тепло по реакции (2) может обеспечить в идеальных условиях взаимодействие 58 860 : 38 790 = 1,51 *молей* углерода по реакции (3).

Идеальный регенеративный газ состоит из чистой окиси углерода; при этом из 3,51 *моля* углерода получится 5,02 *моля* окиси углерода CO (2+2·1,51). Объемная теплота сгорания окиси углерода 3050 *ккал/нм*^{3}, а выход ее в пересчете на исходный углерод при регенеративном процессе составит (5,02×22,4) : (3,51××12) =2,66 *нм*^{3}*/кг*. Состав идеального воздушного и регенеративного газов может быть найден в результате составления следующих уравнений:

Для воздушного газа:

$$2C + O_2 + 3{,}76N_2 \rightarrow 2CO + 3{,}76N_2. \quad (7)$$

Состав газа: CO — 34,8% и N_2 — 65,2%, а теплота сгорания газа 3050·0,348=1060 *ккал/нм*^{3}.

Выход идеального воздушного газа из единицы углерода составит 5,37 *нм*^{3}*/кг*, а к. п. д. процесса собственно газификации, считая по холодному газу, (5,37·1060) : 8100 = 0,7.

Тепло, выделившееся при собственно газификации древесного кокса, расходуется на подсушку щепы, загруженной в шахту, на нагрев газа, выходящего из горловины, на испарение и нагрев жидких продуктов пиролиза древесины, на покрытие тепловых потерь в окружающую среду стенками газогенератора и с золой. Кроме тепла, выделяющегося в зоне собственно газификации, дополнительно выделяется тепло разложения древесины (экзотерма), расходуемое также по указанным направлениям.

Для регенеративного газа:

$$2C + O_2 + 3{,}76N_2 \rightarrow 2CO + 3{,}76N_2;$$

$$1{,}51\,(C + CO_2 + 3{,}76N_2) = 3{,}02CO + 5{,}68N_2. \qquad (8)$$

Выход идеального регенеративного газа из чистого углерода кокса составит 7,68 *нм*^{3}/*кг*. При этом состав идеального дутья следующий: O_2 — 8,4%; CO_2 — 12,6%; N_2 — 79%, а к. п. д. процесса собственно газификации по регенеративной схеме, считая по холодному газу, будет равен единице $(7{,}68 \cdot 1060) : 8100 = 1$, что в практике не встречается.

Следовательно, теоретический выход идеального регенеративного газа на 43% выше идеального воздушного.

Действительный выход регенеративного газа будет значительно ниже расчетного. Очевидно, что для газогенераторного процесса в ряде случаев можно применять дутье, обедненное свободным кислородом, например дымовой газ, содержащий избыток воздуха. При такой организации газогенераторного процесса можно рассчитывать на понижение температуры в раскаленной зоне газогенератора без применения пара, что в некоторых случаях будет целесообразнее.

Термическое разложение и сушка древесины в шахте газогенератора (зоны I и II) протекают в иных условиях по сравнению с ретортой с внешним обогревом. При газификации эти процессы происходят в токе горячих газов, непрерывно пронизывающих слой щепы.

Выход и состав продуктов пиролиза древесины зависит от сырьевых факторов (влажности и породы древесины, размера кусков, содержания гнили, хвои, листьев и др.) и режимных факторов (скорости нагрева, состава газа, в среде которого происходит пиролиз, температуры процесса и др.). Исследователями обнаружено более 350 индивидуальных продуктов, полученных при пиролизе древесины, причем это число не является окончательным.

На основании многочисленных работ, проведенных советскими и зарубежными учеными, можно сделать некоторое обобщение сведений о термическом разложении древесины и составных ее частей: целлюлозы, гемицеллюлоз, лигнина и экстрактивных веществ.

Пиролиз целлюлозы сопровождается разрывом глюкозидных связей с последующей рекомбинацией образовавшихся радикалов в более термически устойчивые молекулы левоглюкозана, на выход которого оказывает влияние строение целлюлозы, ее зольность, температура процесса и др. Так, при температуре 255° левоглюкозана образуется немного; резко увеличивается его выход и скорость процесса при 310—330°. Из чистой целлюлозы с более плотной структурой и меньшей зольностью выход левоглюкозана достигал 70%. Установлено, что при пиролизе целлюлозы в атмосфере водорода количество левоглюкозана увеличивается. При паровоздушном дутье в газе, образующемся в зоне собственно газификации, содержится водород. Поэтому можно предполагать, что в данном случае условия для образования левоглюкозана из древесины будут более благоприятными, чем при обычном воздушном газогенераторном процессе. В древесной целлюлозе содержится примерно 30—35% целлюлозы аморфной фазы, разлагающейся с образованием не левоглюкозана, а в основном угля, газа, органических кислот, лактонов и других продуктов. Эта часть целлюлозы разлагается легче, чем целлюлоза упорядоченной структуры. Предполагается, что деполимеризация целлюлозы при постепенном нагреве начинается в тех местах, где находятся наименее прочные водородные связи между отдельными макромолекулами.

Продукты пиролиза гемицеллюлоз изучены значительно слабее, так как выделить в чистом виде некоторые их составные части очень трудно. Так, при термическом разложении ксилана и арабогалактана получается уголь, смола, конденсат, содержащий много уксусной кислоты, фурфурола, спиртов и др. Доказано, что не только из целлюлозы, но и при пиролизе гемицеллюлоз образуется большое количество растворимых смол, в которых были найдены фенолы. Установлено, что примерно $^2/_3$ уксусной кислоты образуется из ацетильных групп, связанных с гемицеллюлозами, в частности с ксиланом, примерно $^1/_3$ уксусной кислоты падает на долю других составных частей древесины. Считают, что метиловый спирт образуется из легко отщепляемых метоксильных групп полиуронидов. Но пока еще не отвергается старая теория о возможности образования метилового спирта за счет более прочно связанных метоксильных групп лигнина.

При термораспаде пентоз и гексоз образуются этиленгликоль, ацетол, глицериновый альдегид и ряд нелетучих кислот (например, левулиновая и пирослизевая и др.).

Продуктами пиролиза лигнина, представляющего собой почти наполовину соединения ароматического ряда, состоящие из фенилпропановых звеньев различных видов, образуется много нерастворимой смолы, причем из лигнина древесины хвойных пород получаются производные пирокатехина, а из лигнина дре-

весины лиственных пород, кроме того, еще и производные пирогаллола. Строние лигнина предопределяет химическую природу продуктов его пиролиза. Выход и состав этих продуктов во многом зависят не только от породы исходной древесины и способа получения лигнина, но и от метода его пиролиза.

Так, при сухой перегонке (с внешним обогревом реторты) солянокислого лигнина было получено 45—50% угля, 10—14% смолы и 29—30% водного дистиллята. Из сернокислого лигнина получено около 56% угля и 8% смолы. При пиролизе лигнина под вакуумом в антраценовом масле выход богатой фенолами смолы достигал 38%. При пиролизе лигнина в атмосфере водорода была получена смола, содержащая до 80% фенолов и соединений с карбоксильными группами. При пиролизе лигнина хвойных пород, кроме фенолов, получаются неполные эфиры фенолов (например, гваякол), а из лигнина лиственных пород образуются еще и неполные эфиры пирогаллола. Эфиры этих фенолов мало растворимы в воде, поэтому они содержатся в отстойной смоле.

Судя по данным термоустойчивости, пиролиз составных частей древесины можно представить схематично в такой последовательности: в первую очередь разлагается гемицеллюлоза (220—250°), затем целлюлоза (280—350°) и, наконец, лигнин (280—500°). В действительности строгой стадийности разложения древесины при ее нагревании не наблюдается. Дело в том, что целлюлоза, гемицеллюлозы и лигнин находятся в древесине не изолированно один от другого. Они соединены между собой химическими связями различной прочности, вследствие чего в период интенсивного разложения, например гемицеллюлоз, происходит частичный пиролиз целлюлозы и даже лигнина, хотя лигнин ввиду ароматического строения является наиболее термостойкой составной частью древесины. В гемицеллюлозах наименее стойкими являются полиурониды, более термостойкими — пентозаны и затем гексозаны.

При пиролизе древесины и ее составных частей всегда образуется реакционная вода, количество которой составляет примерно 28—32% от веса полисахаридов, 12—18% лигнина и 22—24% древесины.

В зоне швелевания возможно течение вторичных реакций. Так, присутствующий при паровоздушном дутье перегретый пар способствует увеличению выхода метилового спирта и уменьшению легколетучих эфиров. В этих же условиях возможно отщепление боковых групп от крезолов, кселенолов и др. с образованием простейшего фенола.

Древесный уголь служит катализатором, способствующим отщеплению водорода от некоторых органических веществ жирного ряда. Он также катализирует реакции ароматизации алифатических углеводородов. Некоторые продукты в присутствии

угля начинают разрушаться при более низких температурах, чем обычно. Некоторые смолы, особенно растворимые, крекируются в присутствии древесного угля с образованием газа, низкомолекулярных веществ, сажистого углерода и кокса.

Продукты пиролиза древесины по разному относятся к воздействию повышенных температур. Так, уксусная кислота более стойкая, чем муравьиная, которая разлагается при 170° с образованием воды и окиси углерода. Относительно низка термическая стойкость жирных кислот с большим числом углеродных атомов, т. е. с большим молекулярным весом. Оксикислоты, образующиеся при газификации щепы, также не отличаются высокой термостойкостью.

Итак, в растворимую смолу входят в основном продукты пиролиза гемицеллюлоз и целлюлозы, например левоглюкозан, нелетучие кислоты, лактоны, этиленгликоль, и из лигнина растворимые фенолы. В растворимой смоле находится ряд других веществ, пока еще неизвестных.

Отстойная смола является в основном продуктом пиролиза лигнина, состоящим из фенолов, неполных эфиров фенолов, ароматических и алифатических углеводородов, а также экстрактивных веществ древесины и продуктов их разложения (смоляных и жирных кислот и их производных, восков, спиртов, эфирных масел, обычно содержащихся в древесине, коре, листьях, хвое и т. п.). Не исключается наличие в отстойной смоле продуктов пиролиза полисахаридов в виде ароматизированных углеводородов, фенолов и др.

Часть указанных продуктов имеет небольшую упругость паров при температурах, характерных для зоны швелевания. Поэтому наличие газа, пронизывающего слой топлива, создает более благоприятные условия для удаления с поверхности щепы труднолетучих веществ. Парами этих веществ газ полностью или частично насыщается и выносит их из слоя при относительно низких температурах.

Поэтому пиролиз древесины в газогенераторе можно отождествить с разложением ее под вакуумом, т. е. когда удельный выход жидких продуктов, характерных для обычного ретортного процесса, увеличивается. Кроме того, из древесины получаются некоторые вещества, почти не содержащиеся в конденсатах обычной сухой перегонки древесины при атмосферном давлении и с внешним обогревом реторт. При разложении древесины в шахте газогенератора происходит непрерывное и постепенное охлаждение газа и находящихся в нем жидких и парообразных продуктов. Поэтому вторичные процессы, сопровождающиеся термическим разложением уже образовавшихся продуктов, значительно уменьшаются.

В газе, проходящем через слой щепы, происходит мгновенная конденсация высококипящих веществ, переходящих в ка-

пельножидкое состояние с образованием неоднородной газовой системы — аэрозоля. Поэтому в сыром газе, выходящем из горловины газогенератора, содержатся труднолетучие и термически недостаточно устойчивые продукты (левоглюкозан, смоляные жирные кислоты, оксикислоты, неполные эфиры фенолов и др.).

На установке ЛТА при температуре 60—66° были проведены исследования сырого древесногенераторного газа, полученного при газификации еловой щепы влажностью 13,5%. В результате этой работы получены следующие данные: жидкие продукты сырого газа находятся в нем главным образом в туманообразном состоянии (57—70%) и меньшая часть жидких продуктов — в виде пара (30—43%). Капельножидкая часть сырого газа состоит из 55—68% смолы и 32—45% сконденсировавшихся летучих продуктов (воды, летучих кислот, спиртов, эфиров и др.). В свою очередь сконденсированные продукты состоят из 75—80% воды, а остальная часть представляет собой органические летучие вещества.

Мельчайшие частицы продуктов разложения древесины (смолы) придают газу, выходящему из газогенератора, желтоватую окраску. Кроме жидких продуктов, из древесины образуется швельгаз, состав которого примерно следующий (в объемных %): CO_2 — 18, CO — 30, CH_4 — 10, C_nH_m — 2, H_2 — 40. Швельгаз смешивается с газом, образующимся в зоне собственно газификации.

2. ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ПРОЦЕСС ГАЗИФИКАЦИИ ДРЕВЕСИНЫ

Выход и состав продуктов газификации зависят не только от свойств исходного сырья, но и от режима процесса, а также конструкции газогенератора. Ниже приведены основные факторы, влияющие на конечный результат.

Влияние размера газифицируемой древесины. На старых газогенераторных станциях для газификации применяли древесину в виде метровых дров, швырка или тюльки. Исходное сырье (дрова) подвергалось естественной сушке в поленницах.

Современные газогенераторные установки используют древесину в виде щепы. Применение щепы позволяет повысить теплоту сгорания газа, что приводит к увеличению производительности потребителей газа (мартеновских, стекольных и других печей) и вместе с тем к уменьшению норм расхода газа на единицу продукции, в результате чего резко увеличивается удельная производительность газогенератора при одновременной легкоосуществимой механизации топливоприготовления и топливоподачи. В табл. 1 приведены некоторые показатели работы промышленных газогенераторов на еловых дровах в виде поленьев и щепы относительной влажностью 38%. Как видно

из таблицы, при газификации мелкой древесины (щепы) температура газа на выходе из газогенератора более низкая. Резко повышается скорость процесса газификации, что в конечном итоге приводит к значительному увеличению удельной производительности газогенератора и к заметному повышению выхода жидких продуктов пиролиза древесины при одновременном уменьшении выхода газа.

При газификации щепы различной степени измельчения изменяется также выход жидких продуктов. Так, при использовании сухой еловой щепы размером 60—70 *мм*, выход суммарных смол от веса абс. сух. древесины составил 24%, а при газификации щепы размером 20—25 *мм* смолы получилось 31% [11].

Таблица 1

Сравнительные показатели газификации еловых дров (W=38%) различного измельчения

Показатели	Газификация	
	поленьев	щепы
Размер древесины, *мм*	1000	80
Температура газа на выходе из газогенератора, °С	180	78
Выход сухого газа от веса абс. сух. древесины, *нм³/кг*	1,94	1,6
Теплота сгорания газа (высшая), *ккал/нм³*	1350	1680
Выход жидких продуктов от веса абс. сух. древесины, %:		
смолы	8,4	16,0
летучих кислот (в пересчете на уксусную)	2,1	3,5
метилового спирта	0,9	0,7
Интенсивность газификации на единицу сечения шахты в пересчете на абс. сух. древесину, *кг/м²·ч*	85	190
Время пребывания древесины в шахте газогенератора, *ч*	28	3

Повышение степени измельчения древесины приводит к увеличению поверхности, что обеспечивает большую скорость нагрева щепы и выделение продуктов разложения на поверхность куска.

При пиролизе древесины скорость выделения, например смолы, через торцовую поверхность щепы примерно в 2—3,5 раза больше чем через боковую; скорость выделения летучих кислот через ту и другую поверхности почти одинакова [12]. Поэтому измельчение древесины в рубильных машинах приводит к относительно более заметному увеличению выхода смолы.

Влияние влажности газифицируемой древесины. При газификации более влажной древесины выходы жидких продуктов значительно уменьшаются, а количество газа, наоборот, растет. При газификации древесины в виде поленьев с повышением влажности снижается качество газа. Так, из еловых дров (метровки) при изменении их влажности в пределах 29—43% теплота сгорания генераторного газа уменьшилась с 1540 до 1280 *ккал/нм*^{3}.

Ухудшение качества газа объясняется резким увеличением содержания в нем CO_2 (до 12—14%) и уменьшением содержания CO (до 16—18%) вследствие значительного понижения температуры в зоне собственно газификации.

В табл. 2 приведены производственные данные, полученные на одной из промышленных газогенераторных станций, работающей на щепе.

Таблица 2

Влияние влажности щепы на выход газа и жидких продуктов

Относительная влажность газифицируемой щепы, %	Выход газа в пересчете на абс. сух. щепу, *нм*^{3}/*кг*	Теплота сгорания газа (высшая), *ккал/нм*^{3}	Выход жидких продуктов от веса абс. сух. древесины, %			
			летучих кислот (в пересчете на уксусную)	смолы		
				растворимой	нерастворимой	всего
45,2	1,86	1600	2,04	3,52	7,02	10,54
43,5	1,82	1630	2,15	4,68	7,05	11,73
41,8	1,78	1660	2,31	5,30	7,32	12,62
38,4	1,72	1700	2,73	6,69	7,21	13,90
37,4	1,68	1670	2,86	8,00	7,64	15,64
35,8	1,61	1680	3,22	10,13	7,42	17,55

На опытной установке ЛТА при газификации сухой еловой щепы ($W=20\%$) выход смолы от веса абс. сух. древесины составил 24,7%, а из сырой щепы ($W=52\%$) — 14%. Выход газа из сырой щепы 1,8, а из сухой 1,5 *нм*^{3}/*кг* [13]. На этой же установке производилась газификация осиновой щепы различной влажности со средневзвешенным размером 9,8—11,3 *мм* [14].

Из рис. 2 видно, что температура газа, выходящего из газогенератора, понижается по мере увеличения влажности щепы.

Выходы газа и жидких продуктов в зависимости от влажности осиновой щепы приведены в табл. 3.

За счет уменьшения выхода органических продуктов образуется в среднем 4,2 *нм*^{3}/*кг* газа. При газификации более сырой щепы переход углерода древесины в газ увеличится (рис. 3). Здесь же показан относительный переход в газообразные продукты водорода и кислорода, входящих в состав древесины.

Из рис. 3 видно, что оптимальная относительная влажность газифицируемой щепы будет составлять около 25%. Это имеет

большое практическое значение. Относительная влажность древесины 25% близка к критической. При влажности щепы ниже критической, как известно, наблюдается уменьшение скорости сушки.

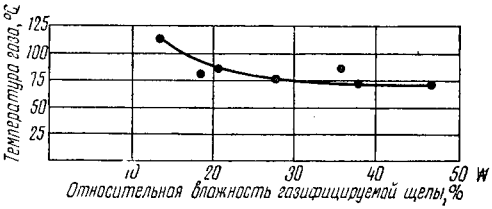


Рис. 2. Температура газа в горловине газогенератора, работающего на щепе различной влажности

Теплота сгорания газа (высшая) с повышением влажности исходной щепы понижалась с 1380 до 1120 *ккал/нм*³. Такое же явление происходило при испытаниях промышленных газогенераторов.

Таблица 3

Выход газа и жидких продуктов в зависимости от влажности газифицируемой осиновой щепы (полузаводские опыты)

Показатели	Опыты						
	1	2	3	4	5	6	7
Относительная влажность щепы, %	13,3	18,6	20,6	28,3	36,0	38,0	47,6
Выход сухого газа в пересчете на абс. сух. древесину, *нм*³/*кг*	1,3	1,34	1,50	1,54	1,59	1,62	1,84
Выход жидких продуктов от веса абс. сух. древесины (по горловине газогенератора), %:							
а) органических веществ	31,8	30,7	29,6	29,6	27,3	26,3	20,6
В том числе:							
летучих кислот (в пересчете на уксусную)	6,4	6,5	6,7	6,8	6,2	6,0	4,2
растворимых смол	13,0	12,0	12,5	10,5	9,5	9,2	6,7
отстойной смолы	10,0	9,2	7,8	8,6	8,0	7,6	6,0
метилового спирта	0,8	0,9	1,1	1,3	1,2	1,1	1,2
эфиров (в пересчете на метилацетат)	0,5	0,5	0,6	0,8	0,8	0,7	0,8
других органических веществ	1,1	1,6	0,9	1,6	1,4	1,7	1,7
б) реакционной воды	23,9	21,2	22,3	26,2	20,7	27,2	24,3

На рис. 4 видно, что с повышением влажности щепы тепловой к. п. д. газогенератора по газу и потери тепла заметно увеличиваются, но при этом падает к. п. д. по жидким продуктам.

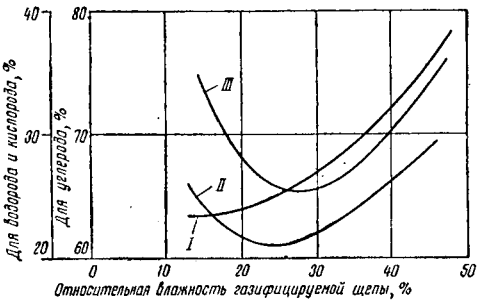


Рис. 3. График перехода углерода (*I*), водорода (*II*) и кислорода (*III*) древесины в газ в зависимости от влажности газифицируемой щепы

Показатели теплового баланса наглядно подтверждают данные материального баланса.

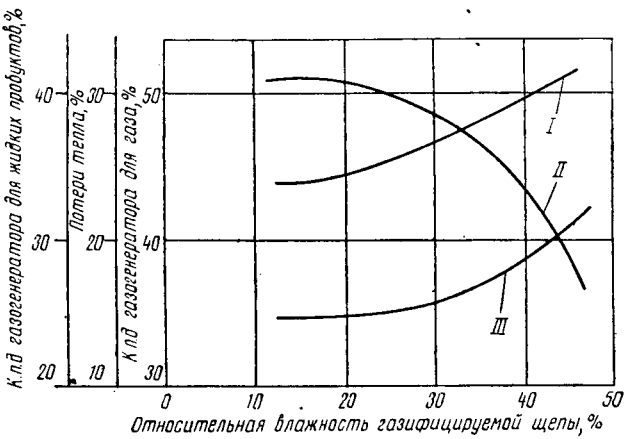


Рис. 4. Распределение потенциального тепла при газификации щепы различной влажности, %:

I — к. п. д. газогенератора по газу; *II* — к. п. д. газогенератора по жидким продуктам; *III* — потери тепла при газификации

Результаты аналогичных исследований, проведенных в ЛТА на еловой мелкой щепе, представлены на рис. 5. Закономерность влияния влажности исходной щепы для осиновой и еловой древесины на выход основных жидких продуктов одинакова.

В опытах с еловой щепой ясно видно отрицательное влияние влажности щепы на количество образующейся реакционной воды.

Увеличение суммарного выхода органических продуктов привело, естественно, к снижению к. п. д. газогенератора по газу (рис. 6).

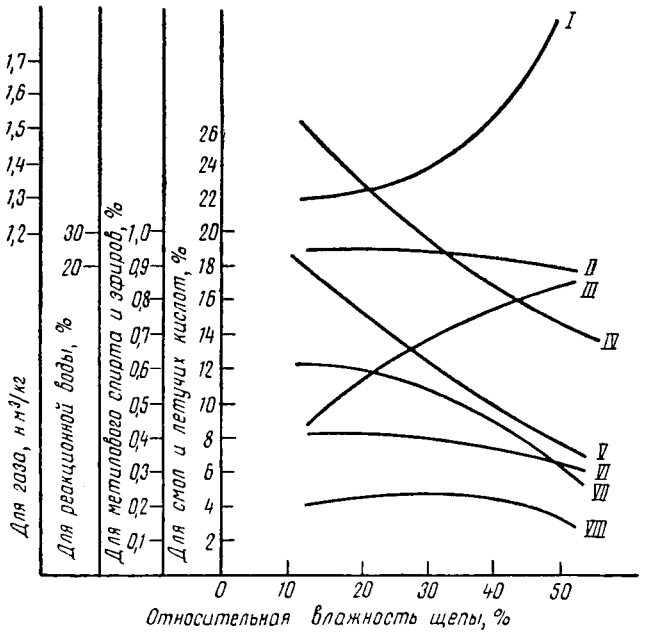


Рис. 5. Выход при газификации еловой щепы различной влажности (опытные данные):

I — газа; *II* — реакционной воды; *III* — метилового спирта; *IV* — всей смолы; *V* — растворимой смолы; *VI* — отстойной смолы; *VII* — эфиров; *VIII* — летучих кислот

Влагосодержание газа, выходящего из газогенератора, при увеличении влажности щепы резко возрастает (рис. 7).

С ростом влажности щепы увеличивается удельный расход воздуха, что неизбежно приводит к повышению выхода газа (см. рис. 5). Ниже приведена зависимость расхода воздуха от влажности газифицируемой еловой щепы.

Относительная влажность щепы, % . .	13,5	15,4	20	36	39	45	46,7	52
Расход воздуха в пересчете на абс. сух. щепу, *нм³/кг* . . .	0,87	0,92	1,035	1,043	1,065	1,085	1,12	1,19

Из приведенных данных видно, что с ростом влажности газифицируемой щепы происходит увеличение выхода газа при одновременном уменьшении количества жидких продуктов и особенно растворимой смолы. В табл. 4 приведены сравнительные данные по пиролизу газогенераторной смолы при 500°. Из таблицы видно, что растворимая смола по сравнению с нерастворимой (отстойной) менее термоустойчива, так как она дает при пиролизе мало масел, но больше газа и кокса. Древесина обладает низкой теплопроводностью. Поэтому при одинаковых скоростях процесса, но при повышенной влажности щепы для испарения всей влаги нужно нагреть каждый кусок древесины до более высокой температуры, чтобы обеспечить необходимую передачу тепла.

При разложении центральных слоев куска древесины выделяющиеся продукты будут встречать на своем пути более нагретую периферийную поверхность, что неизбежно будет вызывать пиролиз этих продуктов и, следовательно, уменьшать их выход.

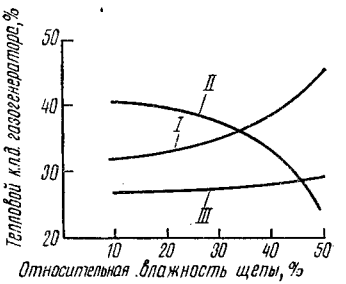


Рис. 6. Изменение теплового к. п. д. газогенератора при газификации еловой щепы различной влажности (опытные данные):

I — по газу; *II* — по жидким продуктам; *III* — потери

Таблица 4

Пиролиз газогенераторной смолы при температуре 500°

Продукты пиролиза смолы	Выход от веса безводной смолы, подвергаемой пиролизу, %	
	растворимая смола	нерастворимая смола (отстойная)
Кокс	55	26
Масла	7	50
Вода	8	6
Газ	30	18

При исследовании процесса газификации сырой древесины в раскаленной зоне газогенератора находили обугленные снаружи куски с неразложившейся древесиной в центральных слоях. Эти наблюдения наглядно подтверждают, что при газификации сырой щепы должен происходить вторичный пиролиз жидких продуктов, образовавшихся из древесины. Смоляной кокс, получившийся при пиролизе жидких продуктов вместе с древесным коксом, будет газифицироваться в зоне собственно

газификации, что повысит удельный расход воздуха на единицу древесного топлива, а следовательно, общий выход газа. Увеличение выхода газа при газификации сырой древесины частично происходит также и за счет швельгаза, образующегося при пиролизе жидких продуктов. Отрицательное влияние повышенной влажности древесины на выход жидких продуктов особенно сказывается при одновременном увеличении размера газифицируемой щепы. В зимнее время, когда влага древесины частично находится в виде льда, выход жидких продуктов также снижается.

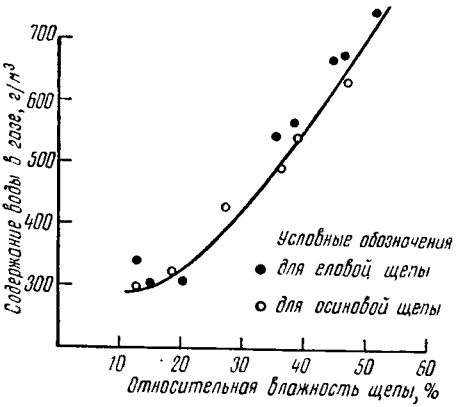


Рис. 7. Влагосодержание генераторного газа в зависимости от влажности газифицируемой щепы

Казалось бы, что выделившееся тепло в зонах собственно газификации и пиролиза древесины может обеспечить нормальную работу газогенератора только при какой-то оптимальной влажности (по расчетам 30—35%), и при более влажной исходной щепе процесс газификации как будто невозможен. На самом деле это не так. В газогенераторе возможна газификация щепы с относительной влажностью 50% и более.

Температура газа, выходящего из газогенератора, при газификации холодной и сырой щепы обычно бывает 75—80°, при этом считается, что генераторный газ насыщен водяными парами. В действительности, как показали исследования, в парогазовой смеси, выходящей из газогенератора, работающего на сырой щепе, иногда более 200 *г* воды (в пересчете на 1 *м*³ неконденсируемого газа) находится в капельножидком состоянии. На первый взгляд эти наблюдения противоречат понятиям о насыщенном газе. Однако результаты исследований находятся в полном соответствии с наблюдениями ряда авторов в области аэрозоля [15]. Мельчайшие частицы смолы, находящиеся в газе, являются «центрами конденсации» влаги.

Исходя из изложенного, можно прийти к выводу, что при газификации щепы имеются предпосылки к частичному удалению влаги без затрат тепла на ее испарение.

Представляет интерес газификация щепы с высокой влажностью. Проведенные опыты на полузаводском газогенераторе [39] позволили газифицировать щепу с относительной влажностью до 60%.

Из табл. 5 видно, что при переработке влажной щепы ($W = 57{,}2 \div 60{,}7\%$) интенсивность газификации в пересчете на абс. сух. щепу колебалась в пределах 150—200 *кг/м²·ч*. При высоком общем слое топлива в газогенераторе (2500 *мм*) слой раскаленного угля в этом случае составлял небольшую величину (160—180 *мм*), тогда как при работе газогенератора на более сухой щепе ($W = 35\%$) высокотемпературная зона достигает примерно 700 *мм*.

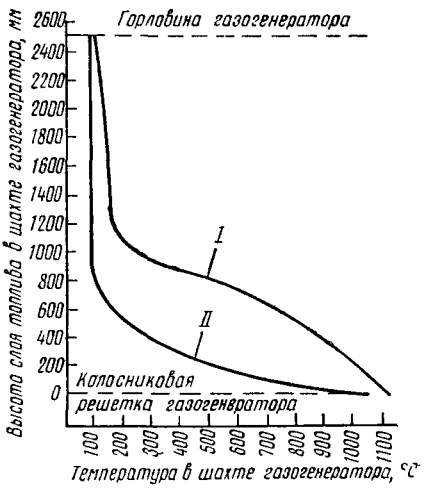


Рис. 8. Изменение температуры по высоте шахты газогенератора в зависимости от влажности газифицируемой щепы:

I — влажностью 35%; *II* — влажностью 60,7%

На рис. 8 приведены кривые изменения температур по высоте шахты газогенератора при переработке щепы с относительной влажностью 60,7% и для сравнения с влажностью 35%.

Исследование проб газа, отобранных из раскаленной зоны газогенератора, расположенной на высоте 100 *мм* над колосниковой решеткой, показали значительные изменения состава газа при переработке сырой щепы в зависимости от температуры.

Данные табл. 6 указывают на то, что газ, образующийся в зоне газификации при переработке сырой щепы, содержит значительное количество H_2 (до 16,7%). Газ в горловине газогенератора был неустойчив по составу (в объемных %): CO_2 — $8 \div 12$; CO — $17 \div 23$; CH_4 — $0{,}5 \div 2$; C_nH_m — $0{,}2 \div 0{,}6$; H_2 — $10 \div 17$; O_2 — $0{,}2 \div 0{,}4$; N_2 — $52 \div 55$.

Теплота сгорания газа (высшая) весьма низкая (1100—1200 *ккал/нм³*). Согласно тепловым балансам при переработке сырой щепы (до 60%) газогенератор работает в основном для получения газа и тепловой к. п. д. его по газу имеет очень высокую величину, достигающую 68,4%, по жидким продуктам в этом случае к. п. д. весьма низкий и равняется 16,4%.

Таблица 5

Показатели газификации сырой щепы в полузаводском газогенераторе

Показатели	Опыты	
	1	2
Относительная влажность газифицируемой щепы, %	60,7	57,2
Интенсивность газификации в пересчете на абс. сух. древесину, *кг/м²·ч*	200	150
Температура газа в горловине газогенератора, °С	82	80
Высота общего слоя топлива в газогенераторе, *мм*	2500	2500
Высота раскаленного слоя угля над колосниковой решеткой, *мм*	160	180
Температура в газогенераторе на колосниках, °С	940—1050	860—1100

Таблица 6

Состав газа раскаленной зоны газогенератора при газификации сырой щепы (в объемных %)

Проба газа	Температура раскаленной зоны, °С	CO_2	CO	H_2	O_2	N_2
1	844	11,3	14,6	16,7	0,2	57,2
2	947	3,2	23,5	7,9	Нет	65,4
3	1060	0,97	25,5	9,8	0,1	63,63
4	1150	0,6	33,0	2,8	Нет	63,6

Примечание. Проба 4 отобрана при газификации еловой сухой щепы (W=35%).

Влияние породы газифицируемой древесины. Выход жидких продуктов пиролиза древесины и их состав зависят от породы исходной древесины. Результаты газификации при воздушном дутье в полузаводском газогенераторе сухой мелкой щепы различных пород приведены в табл. 7.

Из этих данных видно, что наиболее высокий выход газа получается из щепы хвойных пород. Выход смолы почти одинаков, а количество летучих кислот и метилового спирта из лиственной древесины выше.

В табл. 8 приведены выходы жидких продуктов и газа из березовой и еловой древесины, газифицируемой в промышленных газогенераторах, работающих на крупной сырой щепе. Выход летучих кислот из березы значительно выше, чем из щепы хвойных пород. Из еловой щепы получается больше газа и соответственно увеличивается расход дутья.

Таблица 7

Выход газа и жидких продуктов при газификации сухой ($W = 15 \div 20\%$) и мелкой (3—10 *мм*) щепы из различных пород древесины (полузаводские опыты)

Получаемые продукты	Порода древесины						
	ель	сосна	лиственница	береза	бук	осина	ольха
Газ от веса абс. сух. древесины, *нм*³/*кг*	1,51	1,46	1,68	1,30	1,42	1,30	1,69
Жидкие продукты от веса абс. сух. древесины, %:							
смола	24,70	28,30	22,30	30,50	20,90	23,0	21,87
летучие кислоты (в пересчете на уксусную)	4,20	3,90	4,20	9,22	7,65	6,36	5,77
метиловый спирт	0,49	0,51	0,40	1,46	1,15	0,76	1,12
реакционная вода	21,10	22,30	27,60	25,60	21,05	23,86	23,65
Состав газа, объемные %:							
CO_2	6,0	5,6	1,2	4,3	6,1	4,3	3,2
CO	29,5	30,3	29,8	30,8	32,0	30,6	32,2
CH_4	1,7	1,4	2,3	1,4	1,4	1,6	1,0
H_2	7,8	6,8	6,8	5,6	7,0	8,1	6,6
O_2	0,8	0,6	0,5	0,3	0,2	0,4	0,4
N_2	54,2	55,3	59,4	57,6	53,3	55,0	56,0

Увеличение выходов газа и расхода воздуха объясняется тем, что древесина хвойных пород обычно содержит несколько больше углерода по сравнению с лиственной древесиной. При этом несколько увеличивается выход древесного кокса при швелевании, а следовательно, и газа в процессе собственно газификации, протекающем в зоне III газогенератора. Как видно,

Таблица 8

Показатели промышленных газогенераторов, работающих на березовой и еловой щепе

Характеристика щепы			Температура, °C		Расход дутья на абс. сухую щепу, *нм*³/*кг*	Выход от веса абс. сух. щепы				Теплота сгорания газа (низшая), *ккал*/*нм*³
порода	относительная влажность, %	размер, *мм*	газа в горловине	дутья		смолы, %	летучих кислот (в пересчете на уксусную), %	воды разложения, %	газа, *нм*³/*кг*	
Ель	46,8	86	78	50	1,23	12,3	2,62	18,0	1,94	1480
Береза	44,6	80	77	51	1,15	10,0	4,02	21,0	1,75	1510

влияние породы древесины на выходы жидких продуктов пиролиза, осуществляемого в газогенераторах, соответствует тем же закономерностям, которые обычно наблюдаются при сухой перегонке дров и щепы в разных аппаратах [16], [17], [18].

На выход и состав жидких продуктов оказывает влияние такой фактор, как степень поражения древесины гнилью [19]. Опыты показали, что из осиновой щепы, пораженной гнилью, выход смолы составляет около 22%, а из здоровой щепы той же древесины примерно 30%.

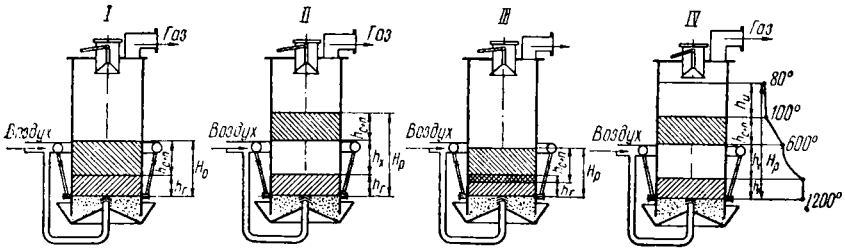


Рис. 9. Схема расположения различных слоев топлива в шахте газогенератора:

$h_г$ — слой древесного кокса, необходимый для завершения процесса собственно газификации кокса; h_{c+n} — слой щепы для завершения процессов сушки и пиролиза древесины; h_x — холостой слой раскаленного кокса; $h_и$ — избыточный слой щепы; H_o — оптимальный слой древесного топлива в газогенераторе, равный $(h_г+h_{c+n})$; H_p — рабочий слой древесного топлива в газогенераторе

Влияние высоты слоя щепы в газогенераторе. При газификации щепы процесс собственно газификации завершается в пределах высоты $h_г$ (рис. 9, I). Под действием тепла, выделяющегося в этой зоне, происходит подготовка щепы (сушка и пиролиз), которая завершается в слое толщиной h_{c+n}.

Толщину слоя раскаленного угля $h_г$ можно определить по составу газа, отбираемого на различной высоте раскаленного угля. Специальные исследования подтвердили предположение о том, что при газификации древесного угля в слое, близком к точке подачи дутья, можно ожидать в газе значительное количество окиси углерода, так как в раскаленной зоне газогенератора газификация древесного угля протекает в диффузионной области процесса.

Для примерного определения высоты раскаленного слоя древесного угля, в пределах которого завершается процесс собственно газификации (зона III), на полузаводском газогенераторе были проведены соответствующие исследования (табл. 9 и 10).

Опыт 1. Относительная влажность газифицируемой щепы 32,5%. Температура дутья 27°. Диаметр газогенератора 400 *мм*.

Расход воздуха 50; 30 и 15 *нм³/ч*. Результаты анализа газа, отобранного на расстоянии 155 *мм* от колосниковой решетки в центре газогенератора, приведены в табл. 9, из которой видно, что в продуктах газификации угля раскаленной зоны содержится немного CO_2 и значительное количество CO. Метана в пробах газа не обнаружено.

Таблица 9

Состав газа и температура в полузаводском газогенераторе на высоте 155 *мм* от подачи дутья (опыт 1)

Показатели	Расход воздуха, *нм³/ч*		
	50	30	15
Температура на колосниках, °C	1180	1160	1140
Скорость воздуха (рассчитанная на свободное сечение шахты по холодному воздуху), *см/сек*	12,1	7,2	3,6
Состав газа, объемные %:			
CO_2	0,66	1,08	1,00
CO	33,82	31,64	32,81
H_2	2,44	1,81	2,91
O_2	Нет	0,17	0,05
N_2	63,08	65,30	63,23

Присутствие водорода объясняется наличием водяных паров в воздухе, поступающем в газогенератор. На основании этого опыта можно считать, что для данного газогенератора $h_г$ не превышает 155 *мм*.

Опыт 2. Этот опыт отличается от предыдущего тем, что расход воздуха был равен 60 и 80 *нм³/ч*. Кроме того, состав газа определяли не только в центре газогенератора, но и около стенки.

Как видно из табл. 10, у стенки газогенератора наблюдается значительное охлаждение зоны. Очевидно, отдельные куски древесины, находясь около стенки газогенератора, подвергаются воздействию более низких температур и поступают на колосниковую решетку недостаточно прошвелеванными.

Наличие в пробах газа, взятых у стенки газогенератора, значительного количества водорода, а также присутствие метана, указывают на то, что в этих точках находится кокс, не подвергшийся высокотемпературной прокалке.

Аналогичные исследования были проведены на дровяном газогенераторе, работающем на дровах с относительной влажностью 32,4%.

Воздух в газогенератор поступал почти сухой, так как его температура была —17°. Интенсивность газификации дров

Таблица 10

Состав газа и температура в полузаводском газогенераторе на высоте 155 *мм* от точки подачи дутья в центре и у стенки газогенератора (опыт 2)

Показатели	Расход воздуха			
	60 *нм³/ч*		80 *нм³/ч*	
	в центре	у стенки	в центре	у стенки
Температура на колосниках, °С	1185	860	1180	805
Состав газа, объемные %:				
CO_2	0,86	8,62	0,94	12,40
CO	33,80	23,40	33,20	21,60
H_2	3,0	18,31	0,80	17,44
CH_4	Нет	0,40	Нет	0,42
O_2	0,04	0,20	0,16	0,24
N_2	62,30	49,07	62,90	49,90

в пересчете на абс. сухую древесину, считая на сечение шахты, составила 57 *кг/м² ч*. Пробы газа для анализа отбирались на расстоянии 280 *мм* от колосниковой решетки. Результаты анализов газа следующие (в объемных %): CO_2 — 2,13; CO — 30,16; H_2 — 0,71; O_2 — 0,28; N_2 — 66,72. Температура в точке забора газа 1075°.

Из этих данных видно, что при относительно медленной газификации древесного кокса в газе, образующемся на расстоянии 280 *мм* от колосниковой решетки, содержится главным образом CO. Это указывает, что процесс собственно газификации протекает также в небольшом слое раскаленного угля и $h_г$ равно примерно 280 *мм*.

При исследовании промышленного газогенератора, работающего на щепе с относительной влажностью 41,2%, температуре дутья 23°, интенсивности газификации в пересчете на абс. сух. топливо 153 *кг/м² ч*, пробы газа отбирались от точки подачи дутья на расстоянии 200 *мм*. Результаты анализов проб газа следующие (в объемных %): CO_2 — 1,8; CO — 31,4; H_2 — следы; O_2 — 0,15; N_2 — 66,65. Температура в точке забора газа 1210°.

Из этих данных видно, что в газогенераторе производственного типа, работающем на щепе с интенсивностью газификации, в 3 раза превышающей самодувный газогенератор, в газе раскаленной зоны содержится 31,4% CO и 1,8% CO_2. В этом случае $h_г$ не превышает 200 *мм*.

На основании проведенных исследований можно считать, что величина $h_г$ для газогенераторов древесного питания незначительна и не превышает 280 *мм*. В действительности $h_г$ будет

меньше этой величины. В раскаленной зоне на высоте 155 *мм* при более интенсивном дутье содержание CO в газе было почти теоретическое (31,64—33,82%).

Ряд исследований промышленной газификации мелкой и сухой щепы ($W=20\div35\%$) с интенсивностью в пределах 200—300 *кг/м²·ч* (по абс. сух. щепе) показали, что слой для подготовки щепы $h_{с+п}$ в газогенераторах небольшой и колеблется примерно в пределах 150—400 *мм*.

Если принять для мелкой и сухой щепы $h_г=200$, а $h_{с+п}=400$ *мм*, то оптимальный слой топлива в газогенераторе $H_о$ должен быть равен 600 *мм*. На самом деле слой щепы в газогенераторе значительно выше на величину $h_х$, называемую холостым слоем топлива [20]. При этом рабочий слой топлива в газогенераторе $H_р$ будет значительно больше оптимального слоя $H_о$ (рис. 9, *II*). Казалось бы нерационально сооружать высокую шахту и поддерживать в газогенераторе большую величину холостого слоя $h_х$. В действительности холостой слой топлива, представляющий собой слой раскаленного угля, полезен, так как он предотвращает образование случайных прогаров, появляющихся при нарушениях подачи щепы в газогенератор и при неравномерности распределения дутья по сечению газогенератора. Холостой слой топлива является своего рода предохранительным слоем. Но чрезмерное увеличение холостого слоя $h_х$ в газогенераторах нежелательно, так как распределение дутья по сечению газогенератора в этих условиях соответственно затрудняется. Между тем равномерное распределение газового потока по сечению шахты газогенератора, заполненного сыпучими материалами (зола, уголь и щепа), представляет собой проблему не только в газогенераторах, работающих на щепе, но и в газогенераторах, применяющих другие виды твердого топлива [10].

Газификацию щепы можно производить при низком слое щепы (рис. 9, *III*). В этом случае слой топлива $h_г$ как бы частично перекрывает слой $h_{с+п}$. При газификации щепы в этих условиях неизбежно уменьшается выход жидких продуктов (смол) вследствие их разложения. Кроме того, снижается калорийность газа с одновременным увеличением его удельного выхода. Работа газогенератора при очень низком слое топлива иногда производится сознательно, когда требуется поддерживать в газопроводах повышенную температуру газа.

С уменьшением слоя щепы в зоне сушки и пиролиза теплообмен становится менее эффективным вследствие искусственного уменьшения его поверхности. Газ выходит из слоя щепы при более высоких температурах, чем при достаточно высоком рабочем слое щепы.

Величина холостого слоя топлива $h_х$ в одинаковых условиях определяется потерями тепла в окружающую среду стенками

газогенератора. Если газогенератор установлен в помещении, то холостой слой будет больше, чем у газогенератора, смонтированного на открытой площадке (вне здания). Опыты показали, что у полузаводского газогенератора с дополнительной теплоизоляцией стенок раскаленный слой угля в шахте всегда больше, чем у газогенератора без дополнительной теплоизоляции.

Кроме холостого слоя угля $h_х$, в газогенераторе можно создать избыточный слой $h_и$, расположенный над $h_{с+п}$. Избыточный слой щепы не может не оказать влияния на результаты газификации щепы, особенно на выход смолы. Чем больше будет избыточный слой, тем ниже должны быть выходы продуктов. На поверхности щепы избыточного слоя неизбежно будет происходить частичное оседание смолы. По мере прохождения щепы по шахте газогенератора смола будет лишь частично возгоняться, что приведет в конечном итоге к некоторым потерям смолы (особенно водорастворимой). Справедливость такого заключения подтвердили опыты, проведенные на полузаводском газогенераторе [21]. При высоте слоя щепы 530 *мм* выход смолы составил 23,4% (от веса абс. сух. древесины), а при слое 1800 *мм* — 17,5%.

Как же создается при газификации щепы холостой слой $h_х$ и избыточный слой щепы $h_и$?

При работе газогенератора с рабочим слоем, равным оптимальному слою ($H_р = H_о$), предельный слой раскаленного угля $h_г$, где завершается собственно газификация, будет представлять собой небольшую, но постоянную по высоте величину. Слой щепы, где полностью завершится сушка и пиролиз щепы $h_{с+п}$, также определяется соответствующим значением.

Газификация щепы будет протекать при оптимальном слое $H_о$. Если искусственно увеличивать слой щепы выше оптимального $H_о$, то между $h_г$ и $h_{с+п}$ произойдет разрыв, который будет определять собой значение $h_х$ (холостой слой). По мере искусственного повышения рабочего слоя щепы будет расти $h_х$. Величина $h_х$ может увеличиваться до известного предела, так как высота холостого слоя (раскаленного угля) определяется величиной тепловых потерь стенками газогенератора. Однако при каком-то предельном значении $H_р$ холостой слой $h_х$ будет максимальным. Если после достижения наибольшего значения $h_х$ продолжать искусственное увеличение общего слоя щепы, то над слоем $h_{с+п}$ образуется избыточный слой $h_и$. Величина $h_и$ может быть любой (по высоте).

Но искусственно увеличивать $h_и$ можно до известного предела, зависящего от размеров газогенератора (шахты).

Величины $h_г$ и $h_{с+п}$ являются основными в шахте газогенератора. Поэтому очень важно придерживаться их оптимальных значений, так как иначе может произойти значительное наруше-

ние процесса газификации в нежелательном направлении: снижение выхода жидких продуктов. Оптимальное значение величин $h_х$ и $h_{с+п}$ необходимо соблюдать для поддержания нормальной эксплуатации газогенератора. Холостой $h_х$ и избыточный слой $h_и$ служат своего рода резервом топлива в шахте газогенератора.

При работе газогенератора на очень сыром топливе в избыточном слое $h_и$ происходит формирование туманообразных частиц смолы и воды. В ряде случаев при необходимости этот слой полезно увеличивать. Однако при работе газогенератора на сухой мелкой щепе поддерживать в газогенераторе большую высоту избыточного слоя нежелательно, так как это приведет к уменьшению выходов смолы.

В промышленной практике работы газогенераторных установок щепа не имеет строгих кондиций по размеру, наличию мелочи, влажности, составу и т. п. Газогенераторы не работают при одном и том же строгом режиме по производительности. Кроме того, часто происходят естественные нарушения в распределении дутья по сечению шахты, колебания температуры дутья, колебания потерь тепла стенками газогенератора и др. Все эти факторы влияют на оптимальное значение основных величин слоя. Поэтому в газогенераторе необходимо поддерживать рабочий слой топлива таким, чтобы автоматическое изменение $h_г$ и $h_{с+п}$ происходило в недрах слоев $h_х$ и $h_и$.

На величину рабочего слоя $H_р$ немаловажное влияние оказывает слой золы, находящийся в газогенераторе. Даже при механизированном способе удаления золы, шлак накапливается в шахте на высоте 1500—2000 *мм* над дутьевыми фурмами и располагается у стенок газогенератора, образуя по сечению шахты огромную воронку, расширяющуюся кверху.

На основании ряда исследований и обобщения производственного опыта можно сделать вывод, что для сухой и мелкой щепы рабочий слой $H_р$ для промышленных газогенераторов должен находиться в пределах 2500—3500 *мм*.

На рис. 9, *IV* изображен примерный график изменения температуры в шахте газогенератора при работе его с рабочим слоем $H_р$, равным $h_г+h_х+h_{с+п}+h_и$.

Газификация щепы в газогенераторах может происходить при свободном и постоянном слое топлива. Газификация при свободном слое щепы характеризуется тем, что в газогенераторе автоматически устанавливается различная высота топлива H_1, H_2, H_3, зависящая от различных причин: производительности газогенератора, влажности и степени измельчения щепы, желаемой температуры выходящего газа и др. В газогенераторе с постоянным слоем газификация щепы происходит при неизменной высоте топлива $H_р$. На рис. 10 и 11 приведены схемы газогенераторов со свободным и постоянным слоем щепы.

Влияние производительности газогенератора. Производительность газогенератора по древесине может влиять на выход газа и смолы в зависимости от того, при каких условиях производится газификация щепы. При увеличении производительности газогенератора со свободным слоем щепы удельный выход жидких продуктов (смолы) увеличивается, а газа уменьшается. Повышение производительности газогенератора сопровождается неизбежным повышением скорости нагрева щепы, а следовательно, и пиролиза древесины, что приводит к увеличению

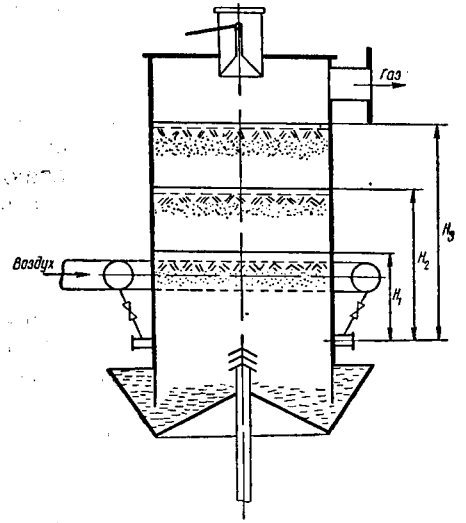


Рис. 10. Схема газогенератора со свободным слоем топлива

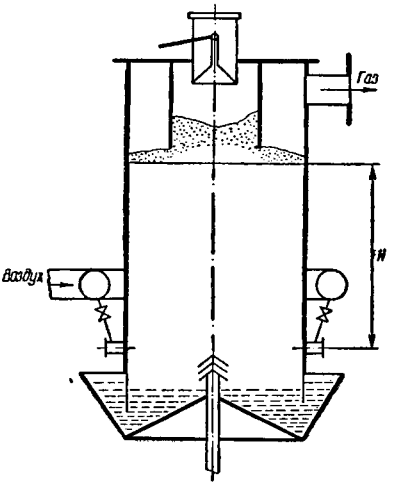


Рис. 11. Схема газогенератора с постоянным слоем топлива

выходов смолы и уменьшению выхода кокса [22]. При уменьшении выхода кокса уменьшается расход дутья, а следовательно, и удельный выход газа. С увеличением производительности газогенератора при свободном слое автоматически возрастает высота холостого раскаленного слоя $h_х$ и $h_{с+п}$, т. е. общий слой щепы увеличивается.

Другая картина наблюдается при повышении производительности газогенератора с постоянным слоем топлива в шахте. В этом случае форсировка газогенератора приводит к тому, что необходимая высота слоя для сушки и пиролиза щепы $h_{с+п}$ может не образоваться. Этот слой сжимается, так как при увеличении расхода дутья общий слой щепы остается неизменным, а $h_х$ растет. При сжатии слоя $h_{с+п}$ время для сушки щепы и ее пиролиза сокращается, что может привести к заметному уменьшению выхода смолы и других жидких продуктов. Наиболее заметно отрицательное влияние производительности газогенера-

тора на выход смолы наблюдается на крупной и более влажной щепе. При форсировке газогенератора с постоянным слоем $h_{с+п}$ может увеличиваться за счет уменьшения холостого слоя $h_х$. Происходит как бы сжатие раскаленного слоя угля. Однако это явление только кажущееся. Процессы сушки и пиролиза щепы будут протекать в значительной степени в слое раскаленного угля, т. е. в зоне холостого слоя. При этом в верхней части холостого слоя (раскаленного угля) может находиться большое количество недообугленных кусков древесины (головни), из которых не получится нормальное количество смолы.

Удельная производительность газогенераторов, или интенсивность газификации топлива, определяется, как известно, количеством абс. сух. древесины, перерабатываемой за единицу времени в пересчете на единицу сечения шахты (*кг/м²·ч*). Изменение выхода смолы и газа при газификации щепы со свободным слоем топлива в зависимости от производительности можно охарактеризовать следующими данными, полученными при испытании промышленных газогенераторов: интенсивность газификации по абс. сух. щепе $z_1 = 174$ *кг/м²·ч* и $z_2 = 162$ *кг/м²·ч*, выход смолы и газа соответственно равен 20,6—15,7% и 1,64—1,78 *нм³/кг*.

При работе газогенератора при постоянном слое топлива показатели были следующие: $z_3 = 645$ *кг/м²·ч* и $z_4 = 382$ *кг/м²·ч*; выход смолы и газа соответственно равен 16,4—20,8% и 1,31—1,09 *нм³/кг*.

Важным вопросом при создании газогенератора для щепы является выбор его производительности. Из опыта лучших производственных газогенераторов, действовавших десятки лет в промышленности, видно, что средняя производительность их в пересчете на абс. сух. древесину составляет примерно 2000 *кг/ч*; диаметр промышленных газогенераторов в зоне подачи дутья около 3 *м*; интенсивность газификации древесного топлива с исходной относительной влажностью 30% примерно 400 *кг/м²·ч*. В нижней части газогенератора собственно газификации подвергается не щепа, а продукт ее сухой перегонки — древесный уголь. Если сравнить интенсивность газификации древесного угля и антрацита [10] и сопоставить удельную подачу воздуха в шахту газогенератора для того и другого вида топлива, то будет видно, что газогенераторы на антраците работают с интенсивностью в 2,7 раза большей, чем газогенераторы на древесном топливе (табл. 11).

Если в газогенераторе, работающем на щепе, обеспечить интенсивность подачи дутья такую же, как в антрацитовом, то можно почти утроить его производительность.

Древесный уголь обладает гораздо большей реакционной способностью по сравнению с антрацитом, поэтому можно предположить, что удельную производительность газогенератора

Таблица 11

Сравнительные показатели работы газогенераторов на различном топливе

Показатели	Вид топлива	
	антрацит	щепа
Влажность топлива, %	5	30
Зольность топлива, %	11	1
Теплота сгорания топлива (низшая), *ккал/кг*	6700	2900
Расход воздуха в пересчете на единицу топлива, *нм³/кг*	2,8	0,77
Интенсивность газификации, *кг/м²·ч*	300	400
Удельный расход воздуха в пересчете на единицу сечения шахты, *нм³/м²·ч*	840 (270%)	310 (100%)
Удельное количество топлива, выраженное в калориях, в пересчете на единицу сечения шахты, 10^6 *ккал/м²·ч*	2,0	1,16
Количество шлака в пересчете на единицу сечения шахты, *кг/м²·ч*	33	4
Теплота сгорания сухого газа, *ккал/нм³*	1230	1500
Выход газа на единицу топлива, *нм³/кг*	4,10	1,15

древесного питания можно повысить еще больше. На специальном опытном газогенераторе интенсивность газификации щепы достигала 2000 *кг/м²·ч* (по абс. сух. древесине).

Однако с повышением производительности газогенераторов неизбежно увеличивается унос с газом древесной мелочи и щепы, что вызывает частые простои газогенераторных установок для чистки горловин и газопроводов. Для предотвращения этого явления целесообразно делать шахту газогенератора с расширяющейся верхней частью. Практика работы опытных и промышленных газогенераторов показала, что унос пыли резко сокращается, если скорость газа при выходе его из слоя щепы не превышает 0,20 *м/сек*. С этой же целью можно рекомендовать отбор газа из шахты через горловину, устанавливаемую в крышке газогенератора (см. рис. 36), а не в стенке шахты, как это делается в некоторых старых конструкциях газогенераторов (см. рис. 29).

Чтобы обеспечить равномерное распределение дутья по сечению газогенератора, необходимо производить подачу воздуха в шахту в основном через фурмы, расположенные в стенке (80—85%), и только частично подавать дутье через центральную колосниковую решетку (15—20%).

ГЛАВА II

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГАЗИФИКАЦИИ ДРЕВЕСИНЫ НА ОПЫТНОЙ УСТАНОВКЕ

Наиболее полно исследованы выходы продуктов на опытной газогенераторной установке Лесотехнической академии им. С. М. Кирова. Эта газогенераторная установка смонтирована вне здания, под навесом (рис. 12). Газогенератор *2* представляет собой коническую шахту, расширяющуюся кверху.

Шахта футерована огнеупорным кирпичом. Дутье (воздух) для процесса поступает через фурмы, расположенные по периферии шахты, диаметр которой на уровне подачи дутья равен 400 *мм*. Возможна также подача воздуха под колосниковую решетку. В верхней части газогенератора, в месте отбора газа, диаметр шахты составляет 600 *мм*, а высота слоя топлива над фурменным поясом — 1200 *мм*.

Необходимый для процесса воздух подается воздуходувкой *4* и измеряется дроссельным прибором *3*.

Щепа периодически загружается в газогенератор через коробку, имеющую герметичный шибер.

Газ, выходящий из газогенератора, проходит через пылеотделитель *5*. В конденсаторе-холодильнике *6* с поверхностью теплообмена 6,4 $м^2$ генераторный газ охлаждается, а затем поступает в каплеулавливатель *7* и далее в центробежный смолоотделитель *8*, представляющий собой вентилятор с 12-лопастным ротором диаметром 300 *мм* и шириной 50 *мм*. Скорость вращения ротора 3800 *об/мин*.

Обессмоленный газ, пройдя каплеулавливатель *9*, направляется в топку *10*. Путем соответствующих переключений можно изменить работу установки: газ, выходящий из газогенератора *2* и фусоотделителя *5*, направить в смолоотделитель *8*, затем в конденсатор-холодильник *6* и после каплеулавливателя *7* в топку *10*.

Таким образом, на опытной установке можно работать по двум схемам:

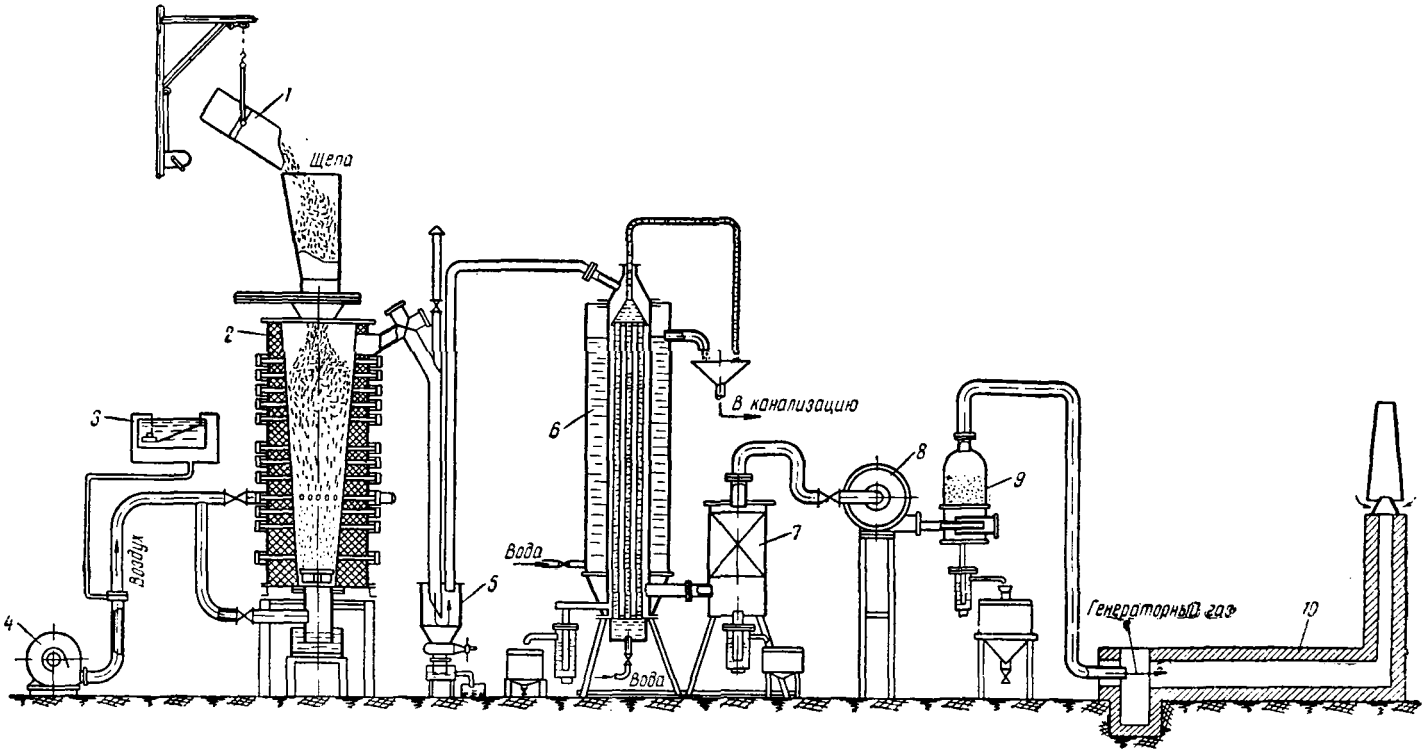


Рис. 12. Схема опытной газогенераторной установки ЛТА им. С. М. Кирова:

1 — подъемник для щепы; *2* — газогенератор; *3* — измеритель расхода воздуха; *4* — воздуходувка; *5* — фусоотделитель; *6* — конденсатор-холодильник; *7* и *9* — каплеулавливатели; *8* — центробежный вентилятор-смолоотделитель; *10* — топка для сжигания газа

1-я схема: газогенератор → конденсатор-холодильник → смолоотделитель → топка;

2-я схема: газогенератор → смолоотделитель → конденсатор-холодильник → топка.

На основе многочисленных опытов в табл. 12 дана технологическая оценка каждой из этих схем обработки генераторного газа.

Таблица 12

Работа опытной газогенераторной установки по двум схемам (степень выделения жидких продуктов из газа различными аппаратами)

Схема работы установки	Температура газа, выходящего из аппарата, °С	Аппарат для осаждения продуктов из газа	Суммарный конденсат, %	Смола, %		Летучие кислоты (в пересчете на уксусную), %	Метиловый спирт, %	Вода, %
				растворимая	отстойная			
1-я	20—22	Конденсатор-холодильник	60	22	32	42	40	78
	19—21	Смолоотделитель . .	40	78	68	58	60	22
2-я	53—56	Смолоотделитель . .	57	96	Почти 100	59	35	24
	22—24	Конденсатор-холодильник	43	4	Следы	41	65	76

Приведенные в табл. 12 показатели получены при работе газогенератора на еловой щепе влажностью 20—25% при температуре газа в горловине газогенератора 80—90°.

Общие коэффициенты выделения жидких продуктов из генераторного газа почти не зависят от схемы работы установки и равны для смолы 99,5—99,8%, летучих кислот 95—97%, метилового спирта 80—90% и воды 92—95%.

При работе установки по 2-й схеме происходит как бы обезвоживание смолы. Так, количество выделенных смолоотделителем из газа кислоты и воды по 1 и 2-й схемам примерно одинаково (58 и 59%, 22 и 24%), а количество выделенной смолы различное: по 1-й схеме 68 и 78%, а по 2-й 96 и почти 100%.

Для изучения процесса газификации щепы эта установка работает по 1-й схеме. Конденсаты из смолоотделителя и конденсатора-холодильника большей частью смешиваются, а затем подвергаются отстою и разделению на жижку и отстойную смолу. Перед смешиванием тот и другой конденсаты разогреваются до 80—90°. Отстой суммарного конденсата производится в течение 24—48 *ч*.

Исходная древесина подвергается измельчению в рубильной машине ДР-3, приспособленной для получения мелкой щепы. Сушка щепы в большинстве случаев производится под навесом,

на открытом воздухе. Продолжительность опыта на газогенераторной установке после достижения установившегося процесса равняется 10—12 *ч*. За это время перерабатывается 450—600 *кг* щепы. Для предупреждения потерь газа через случайные неплотности и при загрузке щепы во время работы установки в горловине газогенератора поддерживается небольшое разрежение (2—4 *мм* вод. ст.).

1. ВЫХОД ПРОДУКТОВ ПРИ ГАЗИФИКАЦИИ ЩЕПЫ ИЗ ЛЕСОСЕЧНЫХ ОТХОДОВ И СТВОЛОВОЙ ДРЕВЕСИНЫ

Лесосечные отходы (ветки и вершины) отличаются от древесины ствола тем, что в этом сырье содержатся повышенное количество коры, а в летнее время и листья. Поэтому химический состав различных лесосечных отходов отличается от стволовой древесины. Состав и выходы жидких продуктов газификации из различных частей дерева также будут отличаться между собой.

Для исследования, результаты которых изложены ниже, использовались лесосечные отходы и стволовая древесина березы, осины и ели, рассортированные на четыре группы: мелкие лесосечные отходы — ветки диаметром до 30 *мм*; крупные лесосечные отходы — ветки диаметром от 30 до 100 *мм*; стволовая древесина — дрова диаметром 100 *мм* и выше; пни и корневая система.

При заготовке образцов было срублено 50 деревьев каждой породы и от них отобраны соответствующие средние пробы по 6—7 *пл. м*^{3}.

Весовое содержание коры в мелких ветках значительно больше, чем в крупных ветках, стволе и корнях. В отличие от древесины лиственных пород в корнях ели коры содержалось больше, чем в древесине ствола (табл. 13).

Для определения химической характеристики исходного сырья большое значение имеет правильный отбор средней пробы исследуемого образца. Особенно это относится к весьма неоднородной по величине и форме щепе из мелких веток, корней, коры и др.

Для указанных целей применяли специальную измельчительную машину, при помощи которой несколько килограммов щепы отбираемой средней пробы превращали в крупные опилки (рис. 13). Из полученных опилок после перемешивания отбирали среднюю лабораторную пробу для анализа.

Химический состав использованных для опытов древесины и древесных отходов приведен в табл. 14, из которой видно, что в стволовой щепе целлюлозы содержалось больше, чем в лесосечных отходах и корнях. Лигнина в корнях и лесосечных отходах обнаружено несколько больше, чем в древесине ствола,

что объясняется наличием в этих отходах значительного количества коры и условиями произрастания корневой системы дерева. Пентозанов в стволовой щепе лиственных пород находилось больше, чем в ветках. Древесина лиственных пород содержала пентозанов больше, чем еловая, что соответствует многочисленным данным других исследований [23], [24].

Очень мало пентозанов содержалось в корневой системе лиственных пород при повышенном количестве в ней лигнина.

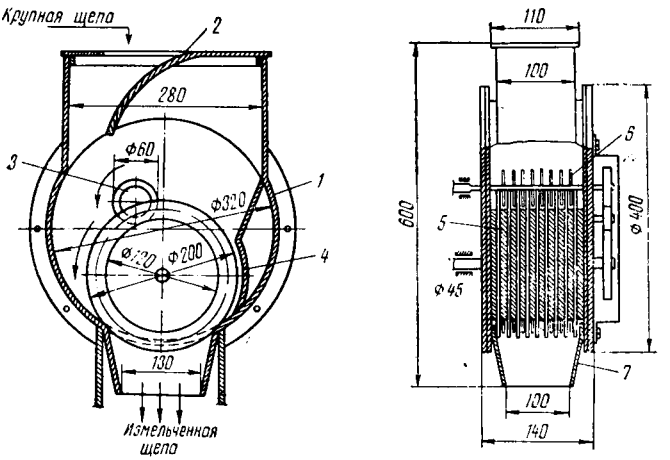


Рис. 13. Схема машины для измельчения щепы:
1 — корпус; 2 — крышка; 3 — зубчатые ролики; 4 — отсекающая лопасть; 5 — металлические прокладки; 6 — дисковые пилы; 7 — воронка для измельченной щепы

Видимо, по этой причине биологическая стойкость корневой древесины выше, чем древесины ствола. Веществ, растворимых в горячей воде, эфире и спирто-бензольной смеси, в образцах мелких веток, особенно с листьями, находилось значительно больше, чем в стволовой древесине. Тут сказалось влияние коры, количество которой в ветках достигало 34—37%. Золы в лесосечных отходах и корневой системе оказалось заметно больше, чем в древесине ствола, что также соответствует данным, приводимым в различных литературных источниках [23], [24].

Наблюдались общие закономерности для образцов щепы из лиственных пород и ели. Так, лигнина в лесосечных отходах было больше, чем в стволе, а целлюлозы, наоборот, меньше. В ветках содержалось больше экстрагируемых веществ и золы. В отходах из-за повышенного количества коры содержалось веществ, растворимых в органических растворителях, значительно больше, чем в остальных образцах древесины лиственных пород.

Колебания в химическом составе различных видов древесного

Таблица 13

Содержание коры, листьев (хвои) и гнили в стволовой древесине и лесосечных отходах (в % от веса абс. сух. щепы)

Части дерева	Мелкие ветки диаметром до 30 *мм*					
	береза		осина		ель	
	без листьев	с листьями	без листьев	с листьями	без хвои	с хвоей
Кора	24,5	26,8	34	37,2	34,3	32,8
Листья (хвоя)	—	17,8	—	16,4	—	20,7
Гниль	—	—	—	—	—	—
Древесина	75,5	55,4	66	46,4	65,7	46,5

Части дерева	Крупные ветки диаметром 30—100 *мм*			Ствол диаметром 100 *мм* и выше			Пни и корни		
	береза	осина	ель	береза	осина	ель	береза	осина	ель
Кора	16,7	23	13,5	9,2	9	9,6	4,1	3,8	15,5
Листья (хвоя)	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Гниль	—	—	—	—	8	—	—	—	—
Древесина	83,3	77	86,5	90,8	83	90,4	95,9	96,2	84,5

сырья и особенно лесосечных отходов зависят от количественного соотношения и химического состава отдельных частей дерева, входящих в его состав. Химический состав исследованных в газогенераторе образцов древесины различных пород, изложенный в табл. 15, 16, 17 и 18, можно использовать для оценки различного древесного сырья в промышленной газификации и пиролизе его в различных ретортах.

Заметное различие в химическом составе мелких веток с листьями и без листьев (табл. 14) объясняется тем, что в листьях содержалось большое количество экстрагируемых веществ (табл. 15). Так, веществ, растворимых в горячей воде, содержалось 29—32,5% (в хвое 32,7%), в эфире 7,96—8,42% (в хвое 12,2%), в спирто-бензольной смеси 14,7—17,5% (в хвое 36,8%).

Повышенная зольность лесосечных отходов с листьями объясняется большой зольностью листьев 4,22—5,65% (хвои 3,3%).

По составу листья и хвоя отличались от веток пониженным содержанием целлюлозы и пентозанов и повышенным содержанием лигнина и особенно полиуроновых кислот.

Указанное различие в химическом составе веток и листьев

Таблица 14

Химический состав лесосечных отходов и стволовой древесины в пересчете на абс. сух. навеску в %

Составные части	Мелкие ветви диаметром до 30 *мм*						Крупные ветки диаметром 30—100 *мм*			Ствол диаметром 100 *мм* и выше			Пни и корни		
	береза		осина		ель										
	без листьев	с листьями	без листьев	с листьями	без хвои	с хвоей	береза	осина	ель	береза	осина	ель	береза	осина	ель
Целлюлоза, определяемая по азотно-спиртовому методу	34,4	30,0	39,5	34,2	39,0	31,6	41,7	42,5	44,7	46,4	49,7	51,9	40,6	44,5	46,9
Лигнин, определяемый по сернокислотному методу	26,4	27,2	25,4	25,2	34,0	35,1	24,8	24,2	28,4	21,6	21,9	27,5	27,3	24,1	31,7
Пентозаны	19,0	17,1	18,3	16,7	12,1	9,96	19,3	20,5	9,45	23,4	19,4	7,89	14,7	16,5	7,29
Полиуроновые кислоты	8,80	8,80	7,83	10,30	7,70	6,74	9,03	8,52	5,03	6,34	5,41	4,40	6,04	5,42	3,80
Вещества, растворимые в горячей воде	6,21	18,80	6,88	21,7	6,98	13,70	4,76	6,40	3,10	2,51	3,83	2,89	3,44	4,90	5,95
Вещества, растворимые в серном эфире	3,38	5,77	3,08	5,35	4,04	6,66	2,29	2,62	3,37	1,49	1,46	2,07	1,52	1,64	2,79
Вещества, растворимые в спирто-бензольной смеси (1 : 1)	5,75	9,97	7,79	12,10	6,06	16,80	4,28	7,00	6,80	2,52	3,45	3,26	4,16	5,24	8,51
Метоксильные группы ($-OCH_3$)	5,35	5,16	6,10	4,83	4,69	4,54	6,00	5,10	4,67	6,55	5,22	4,90	5,56	5,60	5,84
Зольность	1,16	2,47	1,65	3,05	1,80	1,97	0,81	0,92	0,70	0,29	0,75	0,53	0,97	0,49	0,87
Легкогидролизуемые вещества (РВ) при гидролизе 100°	14,1	21,75	17,4	21,6	15,5	12,2	15,7	16,2	7,01	14,2	13,9	8,15	14,2	13,9	9,09
Метоксильные группы ($-OCH_3$) в лигнине	11,0	10,1	10,7	9,5	10,2	9,3	16,7	17,6	12,7	18,9	19,3	14,6	13,8	10,6	12,2

Таблица 15

Химический состав листьев и хвои (в % от абс. сух. навески)

Составные части	Березовые листья	Осиновые листья	Еловая хвоя
Целлюлоза, определяемая по азотно-спиртовому методу	25,2	25,0	22,5
Лигнин, определяемый по сернокислотному методу	34,2	29,5	30,5
Пентозаны	17,9	11,2	6,39
Полиуроновые кислоты	12,2	11,55	7,8
Вещества, растворимые в горячей воде	32,5	29,0	32,7
Вещества, растворимые в серном эфире	8,42	7,96	12,2
Вещества, растворимые в спиртобензольной смеси (1 : 1)	14,7	17,5	36,8
Метоксильные группы (—OCH_3)	2,3	2,55	3,21
Зольность	4,22	5,65	3,3
Легкогидролизуемые вещества (РВ)	17,6	14,9	14,0
Метоксильные группы (—OCH_3) в лигнине	2,77	4,02	3,9

отразилось на выходе растворимой смолы, количество которой из веток с листьями (хвоей) было примерно на 40% меньше, чем из веток без листьев (хвои). Но не только листья являются характерной частью лесосечных отходов. В них содержится в значительных количествах кора, особенно в мелких ветках.

Таблица 16

Химический состав еловой коры, веток и ствола (на абс. сух. навеску в %)

Составные части	Мелкие ветки диаметром до 30 *мм*	Крупные ветки диаметром 30—100 *мм*	Ствол диаметром 100 *мм* и выше
Целлюлоза, определяемая по азотно-спиртовому методу	24,0	26,9	27,1
Лигнин, определяемый по сернокислотному методу	33,4	29,5	30,4
Пентозаны	9,96	9,21	8,4
Полиуроновые кислоты	8,9	8,81	8,8
Вещества, растворимые в горячей воде	18,5	20,3	21,4
Вещества, растворимые в эфире	10,5	9,32	8,23
Вещества, растворимые в спиртобензольной смеси (1 : 1)	23,1	23,5	24,0
Метоксильные группы (—OCH_3)	2,9	2,95	3,1
Зольность	2,86	1,86	2,41
Легкогидролизуемые вещества (РВ)	13,1	16,0	13,0
Метоксильные группы (—OCH_3) в лигнине	5,8	4,5	4,9

Из табл. 16 видно, что еловая кора веток и ствола по химическому составу мало различалась между собой, хотя в коре веток наблюдалось уменьшение целлюлозы, веществ, растворимых в воде, метоксильных групп, а содержание лигнина, пентозанов, полиуроновых кислот и веществ, растворимых в эфире, несколько больше.

Таблица 17

Химический состав еловой древесины без коры (на абс. сух. навеску в %)

Составные части	Мелкие ветки диаметром до 30 *мм*	Крупные ветки диаметром 30—100 *мм*	Ствол диаметром 100 *мм* и выше
Целлюлоза, определяемая по азотно-спиртовому методу	40,1	50,9	51,1
Лигнин, определяемый по сернокислотному методу	31,6	28,5	27,2
Пентозаны	10,3	10,0	8,23
Полиуроновые кислоты	4,71	3,71	3,55
Вещества, растворимые в горячей воде	5,20	2,65	2,23
Вещества, растворимые в серном эфире	2,67	1,96	1,88
Вещества, растворимые в спиртобензольной смеси (1 : 1)	6,49	4,04	2,65
Метоксильные группы ($—OCH_3$)	5,65	5,36	5,52
Зольность	0,49	0,38	0,13
Легкогидролизуемые вещества (РВ)	12,5	11,1	7,43
Метоксильные группы ($—OCH_3$) в лигнине	13,6	14,75	15,6

По химическому составу еловая древесина веток и ствола (без коры) заметно различалась между собой. Так, в мелких ветках полисахаридов содержалось примерно на 20% меньше, чем в древесине ствола, а лигнина, веществ, растворимых в различных растворителях, содержалось больше (табл. 17).

Как видно из приведенных аналитических данных, содержание метоксильных групп в лигнинах различно. В лигнине березовой и осиновой стволовой древесины (без коры) метоксильных групп содержится 20,5—20,4% (табл. 18), а в лигнине обескоренной еловой стволовой древесины — 15,6%, что не противоречит данным литературных источников.

Количество метоксильных групп в лигнине еловой коры колебалось от 4,5 до 5,8%. В лигнине окоренной древесины мелких и крупных веток ($—OCH_3$) содержалось 13,6 и 14,75%, т. е. меньше, чем в лигнине стволовой древесины.

Весьма низко содержание метоксильных групп в лигнине хвои и листьев.

Таблица 18

Химический состав березовой и осиновой стволовой древесины без коры (на абс. сух. навеску в %)

Составные части	Березовая древесина	Осиновая древесина
Целлюлоза, определяемая по азотно-спиртовому методу	47,1	53,4
Лигнин, определяемый по сернокислотному методу	20,5	19,4
Пентозаны	24,7	22,0
Полиуроновые кислоты	5,49	7,32
Вещества, растворимые в горячей воде	3,00	3,44
Вещества, растворимые в эфире	1,19	1,25
Вещества, растворимые в спирто-бензольной смеси (1 : 1)	2,30	3,12
Метоксильные группы ($—OCH_3$)	6,25	5,14
Зольность	0,24	0,36
Легкогидролизуемые вещества (РВ)	16,8	15,1
Метоксильные группы ($—OCH_3$) в лигнине	20,5	20,4

При проведении исследований в области газификации древесных отходов обычно определяют степень измельчения древесины. Но щепа из отходов имеет весьма неоднородный состав и неопределенную форму. Поэтому средний размер ее определяли весовым методом. Для того чтобы примерно создать некоторое представление о линейных размерах газифицируемой щепы древесных отходов, в табл. 19 приведены условные размеры щепы при соотношении толщины, ширины и длины, равном 1 : 3 : 9. Газификация щепы производилась в основном по 1-й схеме (газогенератор → конденсатор-холодильник → смолоотделитель).

Таблица 19

Условный размер газифицируемой щепы (в *мм*)

Составные части дерева	Толщина			Ширина			Длина		
	Б	О	Е	Б	О	Е	Б	О	Е
Мелкие ветки диаметром до 30 *мм* (без листьев и хвои)	5	5	4	15	15	12	45	45	36
Крупные ветки диаметром 30—100 *мм*	4	4	4	12	12	12	36	36	36
Ствол диаметром 100 *мм* и выше	4	5	5	12	15	15	36	45	45
Пни и корни	5	4	4	15	12	12	45	36	36

Условные обозначения: Б — береза, О — осина, Е — ель.

В среднем влажность щепы составляла 15%, а производительность газогенератора по абс. сух. щепе около 30 *кг/ч*. Эти показатели процесса колебались в допустимых пределах.

Температурные режимы работы газогенераторной установки во всех опытах были примерно одинаковы. Так, температура газа, выходящего из газогенератора, составляла 81—85°, перед конденсатором-холодильником 62—69°, после смолоотделителя 24—29°. Температура дутья в среднем равнялась 16°.

Гидравлический режим характеризовался следующими данными (в *мм* вод. ст.): давление дутья 10—16, разрежение в горловине на выходе из газогенератора 4—7, перед конденсатором-холодильником 16—19, после регулирующей задвижки на всасывающем патрубке смолоотделителя 160—200.

В газопроводах и конденсаторе-холодильнике выделилось из газа около 60% конденсата, а в смолоотделителе около 40%. Смолоотделитель, как правило, работал в условиях, близких к изотермическим.

Конденсаты из конденсатора-холодильника во всех опытах были расслаивающимися и разделялись в приемниках на жижку (водный раствор продуктов) и отстойную смолу. Количество отстойной смолы колебалось в пределах 3—13%. В жижке из лиственных мелких лесосечных отходов концентрация растворимых смол была небольшая (3—4%), а в жижке из стволовой щепы больше (8—9%). Разница в концентрации объясняется различными выходами растворимой смолы, считая от веса абс. сух. щепы. В жижках из конденсатора-холодильника при газификации еловой щепы растворимой смолы содержалось примерно в 1,5—2 раза больше, чем в соответствующих конденсатах из древесины лиственных пород. Отстойная смола в большинстве случаев хорошо отделялась от жижки. Влажность этой смолы невысокая, не более 23%. Количество летучих кислот в отстойной смоле почти не зависело от породы и образца щепы и равнялось 5—6%. Как правило, кислотность смолы была ниже, чем в соответствующей жижке, в 1,5—2 раза. Из смолоотделителя стекали нерасслаивающиеся конденсаты, содержащие в образцах лиственных пород большое количество летучих кислот (8—12%), а в образцах еловых примерно в 1,5—2 раза меньше. Влажность этих конденсатов колебалась в пределах 18—44% (для щепы лиственных пород) и 28—35% (для еловой щепы). При долгом отстое (10—15 суток) иногда происходило расслаивание конденсатов из смолоотделителя при содержании в них более 30% воды.

При газификации щепы из мелких березовых и осиновых веток с листьями отстойная смола получалась твердой и напоминала собой парафин (при температуре 24—29°). Отделение жижки от смолы производилось не в отстойнике, а путем декантации. При 80—90° отстойная смола становилась жидкой и при

охлаждении вновь затвердевала. Работа газогенераторной установки на березовых и осиновых отходах с листьями по 1-й схеме была невозможной, так как трубки кондесатора-холодильника забивались твердой смолой. Поэтому установка работала по 2-й схеме, по которой обессмоливанию подвергался горячий газ (56—60°), после чего он охлаждался в конденсаторе-холодильнике.

Во всех других опытах после отстоя и разделения суммарных конденсатов в смолоотстойнике содержание летучих кислот в суммарной жижке лиственных пород достигало почти 12%, а в еловых 7%. Содержание растворимой смолы в суммарной жижке из лесосечных отходов достигало 23% и для щепы из стволовой части дерева 27%. Эти данные указывают на то, что основное количество летучих кислот и растворимой смолы находилось в конденсате смолоотделителя, а не в жижке, полученной в конденсаторе-холодильнике. Так, в жижке конденсатора-холодильника, полученной при газификации крупных лиственных отходов, растворимой смолы содержалось 5%, а в суммарной жижке, полученной после разогрева (80°) и смешивания конденсатов из конденсатора-холодильника и смолоотделителя с последующим отстоем, содержание растворимой смолы в суммарной жижке достигало 23%.

Такой переход основной массы растворимой смолы из нерасслаивающегося конденсата смолоотделителя в жижку конденсатора-холодильника наблюдалось во всех опытах, в том числе и при газификации еловой щепы.

При отстаивании суммарных конденсатов из древесины лиственных пород появлялась всплывная смола. Так, при газификации мелких веток (без листьев) в суммарном конденсате содержание всплывной смолы доходило до 19%, крупных веток до 12%, стволовой древесины до 7% и корней до 5%. В суммарных конденсатах из еловой щепы всплывная смола не обнаружена ни в одном опыте.

Содержание в суммарной жижке летучих нейтральных веществ почти не зависит от вида перерабатываемого сырья. Так, в березовой и осиновой суммарной жижке концентрация метилового спирта колебалась от 1 до 1,3%, а в еловой 0,5—0,6%. Содержание эфиров для образцов лиственных пород составляло 0,9—1%, а для еловых 0,6—0,8%.

Отстойные и всплывные смолы заметно отличались между собой по удельному весу и содержанию летучих кислот, которых в всплывных смолах было на 25—30% меньше. От всех отстойных и всплывных смол лиственных пород, а также еловых отстойных смол растворимая смола хорошо отделялась при промывке горячей водой.

При этом влажность промытой смолы по сравнению с исходной уменьшалась с 15—40 до 5—10%, а содержание летучих

Таблица 20

Выход продуктов при газификации щепы из различных частей дерева

Газифицируемая древесина	Порода древесины	на абс. сух. щепу, *нм³/кг*		Выход жидких продуктов от веса абс. сух. щепы, %							
				смолы				летучих кислот (в пересчете на уксусную)	метилового спирта	эфиров в пересчете на метилацетат	реакционной воды
		расход дутья	выход газа	всего	растворимой	осадочной	всплывной				
Мелкие ветки диаметром до 30 *мм*	Береза:										
	без листьев	0,915	1,39	20,4	10,5	1,7	8,2	6,9	0,80	0,60	23,2
	с листьями	1,090	1,48	16,8	6,4	10,4	—	4,5	0,63	0,36	28,7
	Осина:										
	без листьев	0,855	1,33	21,2	10,9	3,6	6,7	6,3	0,72	0,54	20,6
	с листьями	1,000	1,46	17,2	6,4	10,8	—	5,6	0,46	0,37	31,0
	Ель:										
	без хвои	1,250	1,71	15,1	6,2	8,9	—	3,23	0,66	0,44	29,3
	с хвоей	1,380	1,93	13,8	6,1	7,7	—	3,21	0,42	0,45	30,5
Крупные ветки диаметром 30—100 *мм*	Береза	0,815	1,25	22,6	13,8	3,3	5,5	7,66	0,98	0,72	28,2
	Осина	0,815	1,18	22,8	13,8	3,6	5,4	6,65	0,61	0,73	24,0
	Ель	1,150	1,64	20,4	12,9	7,5	—	4,70	0,42	0,41	27,1
Ствол диаметром 100 *мм* и выше	Береза	0,775	1,19	25,4	18,1	4,4	2,9	10,50	0,90	0,80	28,4
	Осина	0,720	1,08	26,5	19,3	5,0	2,2	8,12	0,78	0,80	24,1
	Ель	0,870	1,26	24,6	16,8	7,8	—	4,90	0,45	0,61	25,0
Пни и корни	Береза	0,912	1,41	18,7	12,3	5,1	1,3	6,95	0,84	0,81	26,0
	Осина	0,770	1,21	20,3	14,7	4,5	1,1	7,63	0,88	0,78	23,4
	Ель	0,967	1,36	21,3	14,2	7,1	—	4,47	0,43	0,66	27,8

кислот с 6—10 до 1,5—2,5%. Удельный вес смолы после промывки в большинстве случаев уменьшался.

В отстойной смоле содержится примерно 15—20% растворимой смолы, а в всплывной 2—10% (в пересчете на сухую).

Из табл. 20 видно, что выход жидких продуктов из корней и лесосечных отходов значительно ниже выхода при газификации щепы из древесины ствола; по выходу газа наблюдается обратная закономерность. Особенно большой выход газа (1,93 *нм*^{3}/*кг*) получен при газификации еловых лесосечных отходов, содержащих хвою. Смолы из этой же щепы получилось очень мало (13,8%).

Суммарные выходы смолы из отдельных частей дерева лиственных пород (березы и осины) близки между собой. Выход растворимой смолы почти не зависит от породы древесины; исключение составляет щепа из мелких веток с листьями и хвоей. В целом наибольший выход водорастворимой смолы наблюдается из стволовой щепы. Наибольший выход отстойной смолы получен из лесосечных отходов. Например, из мелких осиновых веток с листьями выход отстойной смолы достигает 10,8%.

Таблица 21

Растворимость в серном эфире смолы, содержащейся в газогенераторной жижке

Газифицируемая древесина	Порода древесины	Смола жижки, экстрагируемая эфиром, %
Мелкие ветки диаметром до 30 *мм*	Береза:	
	без листьев	34,7
	с листьями	28,1
	Осина:	
	без листьев	40,5
	с листьями	40,0
	Ель:	
	без хвои	17,3
	с хвоей	11,4
Крупные ветки диаметром 30—100 *мм*	Береза	38,4
	Осина	41,0
	Ель	18,9
Ствол диаметром 100 *мм* и выше	Береза	63,4
	Осина	46,5
	Ель	24,2
Пни и корни	Береза	42,4
	Осина	36,5
	Ель	23,6

Таблица 22

Анализ растворимой в эфире смолы, содержащейся в жижке

Газифицируемая древесина	Порода древесины	Содержание от веса смолы, растворимой в эфире, %		
		фенолов	нейтральных веществ	карбоновых кислот
Мелкие ветки диаметром до 30 *мм*	Береза:			
	без листьев	33,4	4,60	34,4
	с листьями	28,3	2,38	21,0
	Осина:			
	без листьев	33,3	6,40	37,3
	с листьями	32,6	3,34	26,2
	Ель:			
	без хвои	33,8	3,96	57,6
	с хвоей	15,2	1,48	57,2
Крупные ветки диаметром 30—100 *мм*	Береза	21,1	5,70	42,2
	Осина	22,0	4,34	41,8
	Ель	29,6	2,41	55,0
Ствол диаметром 100 *мм* и выше	Береза	30,4	5,53	41,0
	Осина	38,2	3,30	42,2
	Ель	32,4	3,34	42,7
Пни и корни	Береза	26,2	4,80	26,5
	Осина	27,3	7,20	22,2
	Ель	34,7	7,27	46,7

Выход летучих кислот из веток, особенно с листьями, получается меньше, чем из древесины ствола. Проведенные опыты подтвердили общеизвестные данные о том, что из щепы лиственных пород летучих кислот получается больше, чем из еловой древесины. Отстойные промытые смолы, полученные в каждом опыте, были подвергнуты лабораторной разгонке при атмосферном давлении до конечной температуры 280—310°, при этом выход масел изменялся в пределах 45—60%, а пека 35—50%.

Растворимые соли жижки лиственных пород в значительной степени растворяются в серном эфире, чего нельзя сказать о растворимой смоле из еловой щепы (табл. 21).

Наблюдается снижение смолистых веществ, экстрагируемых эфиром из жижки, полученной при газификации мелких отходов с листьями и особенно из еловых мелких веток с хвоей (11,4%). Результаты анализов эфирорастворимой смолы жижки приведены в табл. 22, из которой видно, что растворяющаяся в эфире смола жижки содержит 15,2—38,2% суммарных фенолов, 1,48—7,2% нейтральных веществ и 22,2—57,6% карбоновых кислот.

Отметим, что значительное количество веществ, содержащихся в эфирной вытяжке, остается пока неизвестным. Особенно их много в экстрагируемой смоле, полученной из корней и отходов с листьями лиственных пород (примерно 45—50%).

В табл. 23 приведены данные о выходах продуктов, содержащихся в маслах отстойной смолы и растворимой в эфире смоле из жижки. Полученные результаты несколько условно отражают выход указанных продуктов, так как количество фенолов, карбоновых кислот и нейтральных веществ в отстойной смоле определялось в маслах, полученных при ее разгонке, что обычно приводит к заниженным результатам. Но, несмотря на это, общая картина распределения указанных продуктов между отстойной смолой и смолой из жижки достаточно убедительна.

При газификации крупных и мелких веток около 60% фенолов находятся в отстойной смоле. Общий выход фенолов может быть несколько завышенным за счет высокомолекулярных кислот, содержащихся в фенолах.

При газификации стволовой щепы лиственных пород большая часть фенолов содержится в жижке (60—65%), а при газификации стволовой щепы ели — в отстойной смоле (65%), что характерно для смол исследуемых пород древесины.

Нейтральные вещества в основном находятся в отстойной смоле (60—90%).

Количество карбоновых кислот в смолистых веществах, полученных при газификации березовой и осиновой стволовой щепы, весьма значительно (более 4%). Причем 92—95% этих кислот находится в смоле, экстрагируемой эфиром из жижки. Общее количество карбоновых кислот, находящееся в смолах, получаемых при переработке мелких веток и корней березы и осины, заметно ниже (1,44—2,05%), особенно из веток, содержащих листья и хвою (0,6—1,09%). При газификации еловой щепы из крупных веток и ствола количество карбоновых кислот в большинстве случаев ниже, чем из щепы лиственных пород (примерно в 1,5—3 раза).

Выход суммарных фенолов из стволовой лиственной щепы достигает 4,83—5,28%, а из веток и корней (в том числе и еловых) получается примерно в 1,5 раза меньше.

В смолах еловой щепы ствола и корней основное количество фенолов находится в отстойной смоле (примерно 70%) и меньшая часть в водном растворе — жижке.

В эфироводе, полученной при экстракции жижки, определяли содержание левоглюкозана поляриметрическим способом. Наибольшее количество левоглюкозана образуется при газификации еловой древесины: почти в 1,5—2 раза больше, чем из древесины березы и осины. В фенолятах смолы, извлеченной эфиром из жижки, определяли содержание условного пирокатехина при помощи уксуснокислого свинца.

Таблица 23

Выход основных продуктов, содержащихся в отстойной смоле и в смоле, извлеченной из жижки эфиром (от веса абс. сух. щепы в %)

Газифицируемая древесина	Порода древесины	Фенолы			Карбоновые кислоты			Нейтральные вещества		
		в отстойной смоле	в смоле, извлеченной эфиром из жижки	всего	в отстойной смоле	в смоле, извлеченной эфиром из жижки	всего	в отстойной смоле	в смоле, извлеченной эфиром из жижки	всего
Мелкие ветки диаметром до 30 *мм*	Береза:									
	без листьев . .	2,32	1,22	3,54	0,35	1,26	1,61	2,05	0,17	2,22
	с листьями . .	2,01	0,61	2,62	0,51	0,38	0,89	1,76	0,04	1,80
	Осина:									
	без листьев . .	1,87	1,47	3,34	0,38	1,67	2,05	1,90	0,28	2,18
	с листьями . .	1,66	0,83	2,49	0,23	0,86	1,09	1,55	0,06	1,61
	Ель:									
	с хвоей	1,88	0,82	2,70	0,33	1,36	1,69	1,46	0,09	1,55
	без хвои . . .	1,73	0,09	1,82	0,25	0,35	0,60	1,65	0,01	1,66
Крупные ветки диаметром 30—100 *мм*	Береза	2,45	1,04	3,49	0,34	2,08	2,42	1,84	0,28	2,12
	Осина	1,77	1,24	3,01	0,27	2,18	2,45	1,12	0,25	1,37
	Ель	2,10	0,92	3,02	0,31	1,24	1,55	1,25	0,07	1,32
Ствол диаметром 100 *мм* и выше	Береза	1,89	2,94	4,83	0,22	3,95	4,17	1,04	0,53	1,57
	Осина	1,86	3,42	5,28	0,40	3,78	4,18	0,94	0,30	1,24
	Ель	2,00	1,03	3,03	0,32	1,13	1,45	1,09	0,11	1,20
Пни и корни	Береза	1,22	1,52	2,74	0,16	1,53	1,69	0,58	0,28	0,86
	Осина	1,46	1,47	2,93	0,23	1,21	1,44	0,67	0,39	1,06
	Ель	2,51	1,20	3,71	0,45	1,05	1,50	1,21	0,02	1,23

Количество условного пирокатехина из осиновой древесины получалось почти всегда больше, чем из соответствующих образцов еловой древесины (табл. 24).

Таблица 24

Выход левоглюкозана и условного пирокатехина (от веса абс. сух. щепы в %)

Газифицируемая древесина	Порода древесины	Левоглюкозан	Условный пирокатехин
Мелкие ветки диаметром до 30 *мм*	Береза:		
	без листьев	1,11	0,53
	с листьями	1,07	0,38
	Осина:		
	без листьев	1,11	0,61
	с листьями	0,90	0,46
	Ель:		
	без хвои	1,02	0,22
	с хвоей	0,70	0,20
Крупные ветки диаметром 30—100 *мм*	Береза	1,84	0,88
	Осина	1,34	1,18
	Ель	3,10	0,69
Ствол диаметром 100 *мм* и выше	Береза	2,50	1,23
	Осина	1,99	2,00
	Ель	4,30	1,20
Пни и корни	Береза	1,94	0,82
	Осина	2,51	0,96
	Ель	3,46	1,00

В табл. 25 приведены выходы продуктов, рассчитанные от веса составных частей газифицированной древесины. Показатели выходов отдельных продуктов указывают на влияние составных частей древесины на выход того или другого продукта и на наличие некоторых зависимостей.

Так, на основании полученных результатов можно предположить, что всплывные смолы образуются преимущественно из коры древесины лиственных пород, а растворимые смолы — из полисахаридов (хотя образование их в некотором количестве возможно и из других частей дерева).

Условный пирокатехин, содержащийся в растворимой эфиром смоле из жижки, можно рассматривать как продукт пиролиза лигнина. Выход условного пирокатехина зависит от породы и вида газифицируемой щепы.

Анализ промытой еловой смолы как мягчителя, полученного из различных частей елового дерева, указан в табл. 26. Наиболее близкой к техническим условиям на мягчитель оказалась смола, полученная из мелких еловых веток с хвоей.

Таблица 25

Выход продуктов от веса некоторых составных частей дерева (в пересчете на абс. сух. вещество в %)

Получаемые продукты	Мелкие ветки диаметром до 30 *мм*						Крупные ветки диаметром 30—100 *мм*			Ствол диаметром 100 *мм* и выше			Пни и корни		
	береза		осина		ель										
	без листьев	с листьями	без листьев	с листьями	без хвои	с хвоей	береза	осина	ель	береза	осина	ель	береза	осина	ель
Всплывная смола от веса коры	34,0	—	20,0	—	—	—	33,0	23,0	—	32,0	24,0	—	32,0	29,0	—
Растворимая смола от веса полисахаридов	16,9	11,5	16,6	10,5	10,6	12,6	19,7	19,3	21,8	23,8	25,9	26,2	20,0	22,2	24,5
Отстойная смола от веса лигинна и веществ, растворимых в спиртобензоле	31,0	28,0	31,0	27,0	22,2	15,0	30,0	29,0	21,0	30,0	28,0	25,0	20,4	19,1	17,7
Левоглюкозан от веса целлюлозы	3,24	3,56	2,81	2,64	2,32	2,2	4,75	3,16	7,4	5,4	4,0	8,3	4,3	5,64	7,4
Пирокатехин от веса истинного лигнина	3,76	2,86	4,6	3,9	1,11	0,95	4,36	5,68	3,0	6,18	9,8	4,7	4,45	5,0	4,0

Таблица 26

Анализ еловой промытой смолы как мягчителя для регенератной промышленности

Образец промытой смолы, полученной при газификации еловой щепы	Влажность, %	Удельный вес при 20°	Механические примеси, %	Водорастворимые кислоты в пересчете на уксусную, %	Вещества, нерастворимые в бензине, %	Смоляные кислоты, %
Технические условия мягчителя для регенератной промышленности	8	1,10—1,25	Не выше 1,5	1,5—3,0	35—65	Не ниже 15
Мелкие ветки диаметром до 30 *мм*:						
с хвоей	12,4	1,070	0,22	0,99	41,0	11,8
без хвои	9,3	1,110	0,26	1,53	48,0	10,3
Крупные ветки диаметром 30—100 *мм*	8,5	1,117	0,19	1,22	54,0	9,8
Ствол диаметром 100 *мм*	12,1	1,137	0,58	0,76	58,5	7,0
Пни и корни	5,3	1,155	0,13	0,46	61,1	6,3

Примечание. Смолу влажностью до 20% не бракуют, а производят пересчет на смолу влажностью 8%.

2. ВЫХОД ПРОДУКТОВ ПРИ ГАЗИФИКАЦИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЛЕСОСЕЧНЫХ ОТХОДОВ

Лесосечные отходы леспромхоза в виде веток и вершин, полученные при разделке главным образом еловых деревьев, измельчались в рубильной машине ДУ-2. Средняя проба этих отходов (щепы) высушивалась в полочной сушилке в течение 2,5—3 *ч* при температуре газового теплоносителя 120—130°. Начальная относительная влажность щепы 43—45%. В лесосечных отходах, использованных для опыта, содержалось 12% хвои и 25% коры. Химический состав исследуемого абс. сух. сырья следующий (в %): целлюлозы (по азотнокислотному методу) 35,5; лигнина (по сернокислотному методу) 33,8; пентозанов 11,8; полиуроновых кислот 6,94; веществ, растворимых в воде, 7,74; веществ, растворимых в серном эфире, 4,73; веществ, растворимых в спирто-бензольной смеси (1 : 1), 7,93; метоксильных групп ($—OCH_3$) 4,59; золы 2,18; легкогидролизуемых веществ (РВ) 12,7.

Газификация лесосечных отходов производилась на установке по 1-й схеме. Относительная влажность щепы, используемой для опыта, 23%. Температура газа, выходящего из газогенератора, 82°. В конденсаторе-холодильнике газ охлаждался до

15° и затем в смолоотделителе и каплеулавливателе за счет теплопотерь до 13°. Суммарного конденсата получено 358 *кг/пл. м*³.

В газопроводе, пыльнике и конденсаторе-холодильнике выделено из газа 70% конденсатов, а в смолоотделителе 30%.

На основании данных табл. 27 вычислено, что в газопроводе и конденсаторе-холодильнике выделено из газа 72% кислот и 85% воды, а в смолоотделителе соответственно 28 и 15%.

Таблица 27

Анализ конденсатов, выделенных из газа

Анализируемый образец конденсата	Состав конденсата, %	Удельный вес конденсата при 20°	Летучие кислоты в пересчете на уксусную, %	Растворимой смолы, %	Влажность, %
Из газопровода и пыльника:					
жижка	96,4	1,04	6	4,2	—
отстойная смола	3,6	1,10	5	—	20,3
Из конденсатора-холодильника:					
жижка	94,7	1,016	5,4	2,7	—
отстойная смола	5,3	1,10	4	—	15,7
Из смолоотделителя (нерасслаивающийся)	—	1,10	5	—	35,1

Смолы из охлажденного газа в смолоотделителе получено 80%, а в газопроводах и конденсаторе-холодильнике 20%. После отстоя и разделения из суммарного конденсата получено 84% суммарной жижки и 16% отстойной смолы.

Анализ суммарной жижки (в %): летучих кислот в пересчете на уксусную 5,5; растворимой смолы 10,3; метилового спирта 0,42; эфиров (в пересчете на метил-ацетат) 0,74; других органических веществ 1,24. Удельный вес при 20° равен 1,042.

Анализ отстойной смолы (в %): летучих кислот 3,55; влажность 15,6. Удельный вес при 20° равен 1,102.

Путем двукратной промывки горячей водой при температуре 80° было установлено, что в отстойной смоле содержится 10% растворимой смолы (в пересчете на абс. сух.). Влажность смолы после промывки почти не изменилась, а содержание летучих кислот уменьшилось с 3,55 до 1,32%; уменьшился и удельный вес промытой смолы с 1,102 до 1,066. Выход основных продуктов, считая от веса абс. сух. лесосечных отходов (в %): летучих кислот в пересчете на уксусную 3,6; метилового спирта 0,3; эфиров 0,53; растворимой смолы 7,1; нерастворимой смолы 8,3; реакционной воды 24.

Выход газа в пересчете на абс. сух. щепу составил 1,78 *нм*^{3}/*кг*, а расход воздуха для процесса газификации 1,23 *нм*^{3}/*кг*. Средний состав газа (в объемных %): CO_2 — 4,95; CO — 23,6; CH_4 — 1,82; H_2 — 9,8; O_2 — 0,2; N_2 — 54,63. В газе, выходящем из смолоотделителя и поступающем в топку, содержалось 13 *г*/*нм*^{3} паров воды.

Элементарный состав лесосечных отходов (в %): C — 51, H — 6,21; O — 40,61; золы — 2,18; органических продуктов, содержащихся в суммарной жижке (в %): C — 67; H — 6,15; O — 26,85; в суммарной отстойной смоле (в %): C — 75,2; H — 8,1; O — 16,7.

Из табл. 28 материального баланса видно, что из 100 *кг* исходной щепы получено жидких органических продуктов (8,3 + + 7,4) = 15,7 *кг*, а газа 159,48 — 122 = 37,48 *кг*, т. е. в 2,4 раза больше. Следовательно, при газификации лесосечных отходов основное количество их превращается не в жидкие продукты, а в газ. Тепловой к. п. д. газогенератора по газу равен 48%, по жидким продуктам 30%, потери тепла при газификации составляют 22%.

Таким образом, основное количество полезно используемой потенциальной тепловой энергии лесосечных отходов перешло в газ и меньшая часть — в жидкие органические продукты.

Промытая горячей водой газогенераторная смола удовлетворяла основным требованиям, предъявляемым ТУ к мягчителю (см. табл. 26), о чем указывают следующие анализы: влажность смолы 10,8%, удельный вес 1,13. Содержание от веса абс. сух. смолы (в %): механических примесей 0,36; кислот, растворимых в воде, 0,75; веществ, нерастворимых в бензине, 23,4; смоляных кислот 19,5.

Эта же смола подвергалась разгонке при атмосферном давлении. Конечная температура разгонки равнялась 340°, влажность полученных масел 10,8%, выход абс. сух. масел от веса абс. сух. смолы 78%, а пека 21% (потери 1%).

Результаты анализа в пересчете на абс. сух. масла (в %): фенолов 47,6; нейтральных веществ 33,1 и карбоновых кислот 2,6.

Выход основных продуктов, содержащихся в промытой смоле, в пересчете на абс. сух. лесосечные отходы (в %): фенолов 3,07, нейтральных веществ 2,16, карбоновых кислот 0,17. Выход этих же продуктов по отстойной смоле (считая от веса абс. сух. еловой щепы) из дров бывает примерно следующий (в %): фенолов 2—2,5, нейтральных веществ 1—1,2, карбоновых кислот 0,3—0,4.

Увеличение выхода нейтральных веществ объясняется наличием терпеновых и других продуктов в хвое и коре, содержащихся в большом количестве в лесосечных отходах. Большой выход карбоновых кислот из стволовой щепы объясняется образованием веществ кислого характера из полисахаридов, содер-

Таблица 28

Материальный баланс на 100 *кг* щепы из промышленных лесосечных отходов влажностью 23% (в *кг*)

Статьи баланса	C	H	O	N	Зола	Всего
Приход						
Щепа абс. сух.	39,2	4,78	31,34	—	1,68	77
Вода в щепе	—	2,56	20,44	—	—	23
Дутье	—	—	28,40	93,6	—	122
Итого	39,2	7,34	80,18	93,6	1,68	222
Расход						
Газ	26,2	1,68	38,0	93,6	—	159,48
Жижка:						
органические вещества	5,56	0,51	2,23	—	—	8,30
вода	—	4,20	33,70	—	—	37,90
Сырая отстойная смола:						
органические вещества	5,56	0,60	1,24	—	—	7,40
вода	—	0,15	1,22	—	—	1,37
Пары воды в газе, выходящем из смолоотделителя	—	0,18	1,47	—	—	1,65
Зола и шлак	—	—	—	—	1,52	1,52
Невязка	+1,88 (4,8%)	+0,02 (0,3%)	+2,32 (2,8%)	—	+0,16 (10%)	+4,38 (2%)
Всего	39,20	7,34	80,18	93,6	1,68	222

жание которых в стволовой щепе заметно выше, чем в отходах. Фенолов в маслах отстойной смолы лесосечных отходов получалось 3,07%, но в них содержалось 58% высокомолекулярных кислот, в том числе смоляных. Общий выход фенолов оказался не 3,07, а 1,3%.

Фенолы, выделенные из масел, подвергались вакуум-разгонке на три фракции. Из табл. 29 видно, что высокомолекулярные соединения, в том числе смоляные кислоты, отгонялись в последнюю очередь, поэтому содержание фенолов в высококипящих фракциях снижалось.

Растворимая смола жижки растворялась в эфире на 35%. В пересчете на растворимую смолу в ней содержалось 16,8% условного пирокатехина и 19,3% левоглюкозана.

Таблица 29

Разгонка фенолов, выделенных из газогенераторной смолы хвойных лесосечных отходов

Фракции фенолов	Остаточное давление в колбе, *мм* рт. ст.	Температура при разгонке фенолов, °С			Выход фракций, %	Содержание фенолов во фракции, %
		в бане сплава Вуда	в парах при разгонке	в парах (приведена к давлению 760 *мм* рт. ст.)		
1	5	100—166	80—110	100—240	23,1	62
2	6	166—198	110—150	240—300	13,2	58
3	6	198—284	150—230	300—390	45,0	26
Пек	—	—	—	—	12,4	—
Потери . .	—	—	—	—	6,3	—

3. ВЫХОД ПРОДУКТОВ ПРИ ГАЗИФИКАЦИИ ЛЕСОПИЛЬНЫХ ОТХОДОВ

В еловых отходах (горбылях и рейках) содержалось 15,8% коры, а в березовых — 14,3%. В табл. 30 приведены исходные данные опытов газификации измельченных лесопильных отходов.

Таблица 30

Опыты газификации щепы из лесопильных отходов

Показатели	Еловая щепа		Березовая щепа (сухая)
	сухая	сырая	
Относительная влажность щепы, %	10—12	49	12—14
Средний размер щепы, *мм*	18	16	19
Производительность газогенератора по абсолютно сухой щепе, *кг/ч* . .	48—55	28—31	45—58
Температура газа в горловине газогенератора	95—105	70—90	105—110
Состав суммарного газогенераторного конденсата, %:			
жижки	79—82	92—93	85—88
отстойной смолы	18—21	7—8	12—15

Выход суммарного конденсата при газификации щепы из сухих еловых отходов составил 308 *кг/пл. м*^{3}, в том числе отстойной сырой смолы 60 *кг/пл. м*^{3}, а из сырых — 580 *кг/пл. м*^{3}, в том числе отстойной смолы 43,5 *кг/пл. м*^{3}. Выход суммарного

Таблица 31

Анализ газогенераторных конденсатов из лесопильных отходов

Газифицируемые лесопильные отходы	Конденсат	Содержание в конденсате, %				
		летучих кислот (в пересчете на уксусную)	метилового спирта	эфиров (в пересчете на метилацетат)	растворимой смолы	воды
Сухие еловые	Жижка	6,6—7,6	1,2—1,6	0,85—0,92	26,1—28,9	—
	Отстойная смола	5,5—5,8	—	—	—	10—24
Сырые еловые	Жижка	1,6—2,2	0,4—0,6	0,2—0,4	4,7—7,1	—
	Отстойная смола	2,0—2,6	—	—	—	13—18
Сухие березовые	Жижка	10,6—11,8	1,97—2,1	1,2—1,3	25,1—28,5	—
	Отстойная смола	7,7—8,9	—	—	—	20—24,4

Таблица 32

Выход основных продуктов при газификации измельченных лесопильных отходов (в пересчете на абс. сух. щепу)

Показатели	Еловая щепа		Березовая щепа (сухая)
	сухая	сырая	
Выход газа, *нм³/кг*	1,41—1,58	2,14—2,15	1,38—1,43
Расход воздуха, *нм³/кг*	0,95—1,06	1,47—1,58	0,92—0,985
Выход жидких продуктов, %:			
смолы:	27,1—24,1	13,0—16,9	25,6—26,8
отстойной	9,6—8,4	5,5—8,9	6,3—8,7
растворимой	15,7—17,5	7,5—8,0	18,1—19,3
летучих кислот (в пересчете на уксусную)	4,4—4,8	2,1—3,0	8,7—8,9
метилового спирта	0,64—0,89	0,48—0,62	1,34—1,49
эфиров (в пересчете на метилацетат)	0,44—0,49	0,23—0,40	0,80—0,94
реакционной воды	23—24	14,0—15,3	26,0—30,4

конденсата из березовых сухих отходов составил 470 *кг/пл. м*^{3}, в том числе отстойной смолы 63 *кг/пл. м*^{3}.

Из табл. 31 видно, что жижки из сухих еловых и березовых лесопильных отходов близки по содержанию растворимой смолы, но резко различаются по количеству летучих кислот. Эти данные не находятся в противоречии с результатами, получаемыми при газификации березовой и еловой щепы из дров (стволовой древесины). Жижка из сырой еловой щепы интереса не представляет. На основании сравнения с другими имеющимися данными можно считать (табл. 32), что по выходам газа и жидких продуктов лесопильные отходы, несмотря на повышенное содержание коры, не уступают стволовой древесине (дровам).

Теплота сгорания генераторного газа (высшая) из сухих еловых и березовых лесопильных отходов колебалась в пределах 1200—1400 *ккал/нм*^{3}, а из сырых 1100—1200 *ккал/нм*^{3}.

4. ВЫХОД ПРОДУКТОВ ПРИ ГАЗИФИКАЦИИ ОТХОДОВ КАТУШЕЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА *

Для катушечного производства используется березовая древесина с полезным выходом готовой продукции 3—4%. Одним из отходов, использованных для опыта, является березовая сухая чурка ($W = 10 \div 12\%$) в виде цилиндров диаметром 40—50 *мм*, не содержащих коры.

Газогенераторная установка работала по 2-й схеме. Интенсивность газификации по абс. сух. древесине равнялась 250 *кг/м*$^2 \cdot$ *ч*. Температура дутья была 0°, температура газа в горловине газогенератора 112°, а после смолоотделителя 63°. Состав газа (в объемных %): CO_2 — 5,5; CO — 31,5; CH_4 — 2,5; H_2 — 8; O_2 — 1; N_2 — 51,5.

Газогенераторные конденсаты осаждались в скруббере-холодильнике (вместо конденсатора-холодильника) и в смолоотделителе. Остальная часть жидких продуктов в виде пара вместе с газом поступала в топку. Содержание парообразных веществ в неконденсируемом газе 280 *г/нм*^{3}. Анализ газогенераторных конденсатов указан в табл. 33.

Выход суммарного конденсата (смесь конденсата из скруббера-холодильника и смолоотделителя) равен 300 *кг/пл. м*^{3}. Состав его (в %): смолы 51, летучих кислот 13, воды 36. Выход жидких продуктов по горловине газогенератора в пересчете на абс. сух. древесину (в %): смолы 27,7, летучих кислот в пересчете на уксусную 9,4, метилового спирта 1,2, реакционной воды 27. Выход газа и расход дутья (в пересчете на абс. сух. древесину) составил 1,24 и 0,81 *нм*^{3}/*кг*. Степень извлечения основных жидких продуктов из газа указана в табл. 34.

---

* Цель опыта — показать выход продуктов из древесины без коры.

Таблица 33

Анализ газогенераторных конденсатов, полученных при газификации березовых отходов катушечного производства

Газогенераторный конденсат	Количество конденсата, %	Содержание в конденсате, %				
		летучих кислот (в пересчете на уксусную)	растворимой смолы	отстойной смолы	метилового спирта	воды
Из скруббера-холодильника	25	13,8	19,6	19,5	—	47,1
Из смолоотделителя	39	12,0	58		—	30,0
В обессмоленном газе	36	8,25	0,6		2,45	88,7

Таблица 34

Распределение жидких продуктов по аппаратам газогенераторной установки

Составные части жидких продуктов	Количество выделенных из газа продуктов, %		Потери (прошло с газом и поступило в топку), %
	в скруббере-холодильнике	в смолоотделителе	
Смола	29,7	69,7	0,6
Летучие кислоты (в пересчете на уксусную)	38,0	42,0	20,0
Вода	21,0	21,0	58,0

К. п. д. газогенератора по газу равен 38%, по жидким органическим продуктам 46%, потери при газификации 16%.

Ниже приведен материальный баланс газификации отходов катушечного производства (в %).

Приход

Загружено в газогенератор березовой чурки	52
Подано дутья в газогенератор	48
Итого	100

Расход

Получено газа	67,1
Получено жидких продуктов	32,8
Получено золы	0,6
Невязка	—0,5
Итого	100

5. ВЫХОД ПРОДУКТОВ ПРИ ГАЗИФИКАЦИИ ОТХОДОВ ФАНЕРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Для производства фанеры употребляется главным образом березовая древесина, часть которой в виде шпона-рванины представляет собой отходы, обогащенные корой. Общее количество отходов от перерабатываемого фанерного сырья равно 40%, половину которых составляет шпон-рванина. На ряде предприятий фанерные отходы используются как топливо или как материал для производства стружечных плит.

Для опытов применялся шпон-рванина ленинградского завода им. Аврова. После измельчения исходный шпон подсушивался в полочной газовой сушилке при температуре теплоносителя 60°. Средний размер измельченного шпона 22 *мм*, насыпной вес его 173 *кг/м*^{3} при относительной влажности $W = 11{,}2\%$. Содержание коры в шпоне-рванине 25%.

В табл. 35 представлены данные химического состава древесины и коры, содержащихся в исходном сырье.

Таблица 35

Химический состав древесины и коры березового шпона-рванины

Составные части шпона-рванины	Количество на абс. сух. навеску, %	
	древесины (березы) без коры	коры (березовой) без древесины
Целлюлоза, определяемая по азотно-спиртовому методу	49,8	24,5
Лигнин, определяемый по сернокислотному методу	25,8	44,5
Пентозаны	24,2	19,6
Полиуроновые кислоты	4,8	6,8
Вещества, растворимые в горячей воде	3,3	13,8
Вещества, растворимые в серном эфире	2,6	9,6
Вещества, растворимые в спирто-бензольной смеси (1 : 1)	3,6	15,3
Метоксильные группы (—OHC_3)	5,0	4,1
Зола	0,21	1,3
Легкогидролизуемые вещества (РВ)	10,1	11,4

Интенсивность газификации 264 *кг/м*$^2 \cdot$ *ч* (по абс. сух. шпону). Установка работала по 1-й схеме. Температура газа в горловине газогенератора составляла 88°, перед конденсатором-холодильником 63°, а после смолоотделителя 17°; температура дутья 15°. Суммарного конденсата при газификации фанерных отходов получилось 378 *кг/пл. м*^{3}, при этом на долю конденсатора-холодильника приходилось 57%, смолоотделителя 43%.

По составу генераторный газ из фанерных отходов близок к газу, получаемому из обычной древесной щепы. В конденсате из конденсатора-холодильника содержалось 92% жижки и 8% отстойной смолы. Анализ жижки (в %): растворимой смолы 12, летучих кислот 14,6, метилового спирта 1,4, эфиров 0,6. Удельный вес жижки при 20° равен 1,07.

Влажность отстойной смолы 20%, содержание летучих кислот в пересчете на уксусную 6,6%. Удельный вес смолы при 20° равен 1,125. Конденсат из смолоотделителя нерасслаивающийся, влажность его 29,3%, содержание летучих кислот 11,5%. Удельный вес конденсата при 20° равен 1,165.

Выход продуктов от веса абс. сух. шпона-рванины следующий (в %): летучих кислот (в пересчете на уксусную) 8,9; метилового спирта 1; эфиров (в пересчете на метилацетат) 0,4; реакционной воды 24,2; суммарной смолы 24,2, в том числе растворимой 12,7 и отстойной 11,5. Выход газа составил 1,39 *нм*^{3}/*кг*. Растворимой смолы (в пересчете на абс. сух.) в отстойной смоле из конденсатора-холодильника содержалось 18%, а в нерасслаивающемся конденсате смолоотделителя 46%. При смешивании всех конденсатов, нагретых предварительно до 80°, и при последующем отстое произошло расслаивание их на три слоя: верхний слой (всплывная смола) 2,4%, средний слой (жижка) 60% и нижний слой (отстойная смола) 37,6%. Всплывная смола напоминала собой березовый сухоперегонный деготь, получаемый на Амзинском сухоперегонном заводе из всплывных масел, скапливающихся при отстаивании обесспиртованной ретортной жижки. Всплывная смола (газогенераторный деготь) была подвергнута разгоке при атмосферном давлении (табл. 36).

Таблица 36

Сравнительные результаты разгонки дегтя, получаемого на Амзинском заводе, и всплывной газогенераторной смолы (газогенераторного дегтя)

Составные части	Выход в % от навески	
	амзинского дегтя	газогенераторного дегтя
Вода до 110°	1,4	3,2
Масла от 110 до 325°	80,5	74,6
Пек	13,5	15,2
Потери	4,6	7,0

Примечание. Влажность газогенераторного дегтя 2,2%.

Исследования исходных дегтей и полученных при их разгонке масел представлены в табл. 37.

Таблица 37

Анализ различных дегтей и масел

Показатели	Амзинский деготь	Газогенераторный деготь	Масла, полученные при разгонке дегтя		Берестяной деготь ГОСТ 2098	
			амзинского	газогенераторного	I сорт	II сорт
Удельный вес при 20°	1,01	1,021	0,954	0,952	0,925—0,950	0,950—0,970
Кислотность водной вытяжки, %	0,96	0,84	1,4	1,54	0,5	1
Кислотное число	38	60	35	45	15—25	30—35
Число омыления	98	120	80	96	36—60	До 85
Вещества, не растворимые в бензине, %	10	7	2,5	4,7	Не более 6	Не более 8

Из табл. 37 и 38 видно, что всплывной слой, получающийся при отстое суммарного газогенераторного конденсата из фанерных отходов, по аналитическим показателям близок к дегтю, получаемому на Амзинском заводе. Масла, полученные при разгонке дегтя, напоминают собой берестяной деготь II сорта. Выход масел от веса исходного дегтя составлял примерно 75%, а от количества фанерных отходов 6,7 *кг/пл. м*^{3}.

Таблица 38

Анализ дегтя и масел, полученных при разгонке дегтя в %

Составные части	Амзинский деготь	Газогенераторный деготь	Масла, полученные при разгонке дегтя	
			амзинского	газогенераторного
Нейтральные вещества	66,5	54,0	70,0	48,0
Фенолы	31,4	37,7	26,3	37,6
Карбоновые кислоты	1,5	8,0	2,5	9,3
Потери	0,6	0,3	1,2	5,1

6. ВЫХОД ПРОДУКТОВ ПРИ ГАЗИФИКАЦИИ ОТРАБОТАННОЙ КАНИФОЛЬНО-ЭКСТРАКЦИОННОЙ ЩЕПЫ

Для опытов использовалась отработанная щепа Вахтанского и Нейво-Рудянского канифольно-экстракционных заводов. Определение выходов продуктов при газификации малосмолистой отработанной экстракционной щепы представляло интерес в связи с тем, что смола, полученная из этого вида сосновой древесины,

может заменить собой кустарную сосновую смолу. Для получения ее в ряде случаев еще используется высококачественный осмол. Характеристика использованной для опытов щепы приведена в табл. 39. Влажность щепы Нейво-Рудянского завода более высокая. На этом заводе в отличие от Вахтанского бензин из отработанной щепы отгоняется насыщенным, а не перегретым паром. Остаточная смолистость в отработанной щепе Вахтанского завода более высокая. Опыт газификации щепы проводился по 2-й схеме [26].

Таблица 39

Характеристика отработанной канифольно-экстракционной щепы

Показатели	Щепа Вахтанского завода	Щепа Нейво-Рудянского завода
Смолистые вещества, растворимые в эфире в пересчете на абс. сух. щепу, %	6,1	4,66
Средневзвешенный размер щепы, *мм*	12,6	6,0
Относительная влажность щепы, %	8,0	33,0
Насыпной вес щепы при рабочей влажности, *кг/м*³	191	210
Элементарный состав в пересчете на абс. сух. щепу, %		
углерод	51,0	46,5
водород	6,2	6,7
кислород (по разности)	41,8	46,0
зола	1,0	0,8

С повышением температуры газа в газоочистной системе с 42—48 до 63—66° доля конденсата из конденсатора-холодильника уменьшалась с 45 до 27%, а из смолоотделителя соответственно увеличивалась с 55 до 73%. Содержание конденсируемых продуктов в газе, выходящем из смолоотделителя, увеличивалось с 60 до 295 *г/нм*³ (табл. 40).

Во втором опыте большее количество влаги поступало в топку с сырым газом, что обеспечивало значительное «обезвоживание» суммарного конденсата. В суммарной жижке содержалось много растворимой смолы (30,3—38,6%), поэтому удельный вес ее был высоким (1,126—1,162). Особенность отстойных смол заключается в относительно низкой влажности (8—9%), что характерно для сосновых смол, содержащих канифольные продукты (табл. 41).

При газификации Вахтанской щепы получалась всплывная смола, так как удельный вес ее оказался ниже удельного веса жижки (соответственно 1,138 и 1,162). Смола из Нейво-Рудянской щепы по сравнению с Вахтанской имела более высокий удельный вес (1,160). Из табл. 42 видно, что выход отстойной смолы достигал 11,6—16,6%, т. е. был значительно больше, чем

Таблица 40

Показатели газификации отработанной канифольно-экстракционной щепы

Показатели	Щепа Вахтанского завода	Щепа Нейво-Рудянского завода
Интенсивность газификации по абс. сух. щепе на уровне фурм периферийного дутья, *кг/м²·ч*	191	244
Высота слоя щепы в газогенераторе, *мм*	780	650
Выход суммарного конденсата в пересчете на исходную щепу, *кг/пл. м³*	256	230
В том числе, %:		
в конденсаторе-холодильнике	45	27
в смолоотделителе	55	73
Температура дутья, °С	8	10
Температура газа, °С		
в горловине газогенератора	120	88
после холодильника	48	66
после смолоотделителя	42	63
Содержание конденсата в газе, выходящем из смолоотделителя, *г/нм³*	60	295
Выход газа в пересчете на абс. сух. щепу, *нм³/кг*	1,2	1,74
Теплота сгорания газа (высшая), *ккал/нм³*	1350	1070

при газификации обычной древесины. Выход растворимой смолы составлял 12,3—14,7%, что несколько ниже, чем из стволовой древесины других пород. Летучие кислоты интереса не представляют, но и их выход ниже, чем, например, из древесины ели.

Из отработанной канифольно-экстракционной щепы Вахтанского завода получилось 85 *кг/пл. м³* сырой всплывной смолы, а из Нейво-Рудянской отстойной смолы 59 *кг/пл. м³*.

Выход абс. сух. суммарной смолы (растворимая и отстойная) колебался в пределах 107—140 *кг/пл. м³*.

При газификации Вахтанской щепы тепловой к. п. д. газогенератора по газу был равен 27,4, а для Нейво-Рудянской щепы — 40,6%; соответственно к. п. д. по жидким продуктам — 50,4 и 38,8%. В первом случае газогенератор можно считать скорее смологенератором, так как к. п. д. по жидким продуктам значительно превышает к. п. д. по газу.

Газогенераторные смолы из отработанной канифольно-экстракционной щепы по основным показателям вполне удовлетворяют требованиям, предъявляемым техническими условиями к смолам-мягчителям (табл. 43).

Выход промытой смолы был равен 90—92% исходной (в пересчете на безводную).

Таблица 41

Анализ суммарных конденсатов, полученных при газификации отработанной канифольно-экстракционной щепы

Составные части продуктов газификации щепы	Щепа Вахтанского завода	Щепа Нейво-Рудянского завода
Состав суммарного конденсата, %:		
жижка	67	75
всплывная смола	37	—
отстойная смола	—	25
Анализ жижки, %:		
растворимая смола	38,6	30,3
летучие кислоты (в пересчете на уксусную)	7,2	3,32
метиловый спирт	—	0,20
эфиры (в пересчете на метилацетат)	—	0,41
Удельный вес при 20°	1,162	1,126
Анализ всплывной смолы, %:		
летучие кислоты (в пересчете на уксусную)	3,78	—
влажность	8,0	—
Удельный вес при 20°	1,138	—
Анализ отстойной смолы, %:		
летучие кислоты (в пересчете на уксусную)	—	2,38
влажность	—	9,0
Удельный вес при 20°	—	1,160

Таблица 42

Выход жидких продуктов при газификации отработанной канифольно-экстракционной щепы (в % от веса абс. сух. щепы)

Продукты газификации щепы	Щепа Вахтанского завода	Щепа Нейво-Рудянского завода
Отстойная смола	16,6	11,6
Растворимая смола	14,7	12,3
Летучие кислоты (в пересчете на уксусную)	3,68	2,4
Метиловый спирт	—	0,42
Эфиры (в пересчете на метилацетат)	—	0,32
Реакционная вода	23,8	26,2

Таблица 43

Анализ смолы, полученной при газификации канифольно-экстракционной щепы, как мягчителя для регенератной промышленности (см. табл. 26)

Смола, полученная при газификации отработанной щепы	Влажность, %	Удельный вес при 20°	Механические примеси, %	Водорастворимые кислоты в пересчете на уксусную, %	Вещества, не растворимые в бензине, %	Смоляные кислоты, %
Вахтанский завод						
Не промытая горячей водой	14,0	1,135	0,62	6,1	31,3	26,0
Промытая горячей водой	13,0	1,107	0,56	2,3	27,1	27,3
Нейво-Рудянский завод						
Не промытая горячей водой	9,2	1,60	1,15	4,2	52,6	26,2
Промытая горячей водой	8,1	—	—	0,71	33,8	32,8

7. ВЫХОД ПРОДУКТОВ ПРИ ГАЗИФИКАЦИИ ЩЕПЫ ИЗ ОСМОЛА И СОСНОВЫХ ДРОВ

Газификация осмола по сравнению с обычным смолокурением протекает в благоприятных условиях (равномерный нагрев щепы, скоростной вынос смолистых веществ из аппарата), что в значительной степени исключает возникновение вторичных реакций, при которых эти продукты разлагаются. При газификации малосмолистого осмола можно получить более высокие выходы смолы, чем в обычных смолокуренных аппаратах, даже при использовании в них осмола высокого качества.

Удельная производительность шахты газогенератора, работающего на щепе, в 100—150 раз выше производительности реакционного пространства смолокуренных печей и реторт, работающих на крупнокусковом осмоле. При газификации осмола нет надобности расходовать древесное топливо. Правда, при газификации не получается древесного угля. Но уголь из осмола не представляет собой большой ценности, так как в нем содержится значительное количество летучих веществ.

Преимущество газогенератора для получения сосновой смолы заключается еще в том, что измельчение осмола в рубильных машинах дешевле ручной разделки на мелкие куски, пригодные для использования, например, в минских ретортах. Существенное преимущество газификации состоит еще в том, что при этой

технологии все производственные процессы можно механизировать [27]. Для опытов использовался различный осмол и сосновые дрова, анализ которых приведен в табл. 44.

Таблица 44

Характеристика сосновой щепы, использованной для газификации

Опыт	Использованное сырье	Количество сырья, %	Содержание от веса абс. сух. щепы, %		Насыпной вес щепы, *кг/м³*	Относительная влажность щепы, %	Средний размер щепы, *мм*
			смолистых веществ	в том числе скипидара			
1	Осмол	62	13,1	0,85	260	30	—
	Сосновые дрова	38	7,5	0,36			
2	Осмол	100	9,15	0,40	—	—	14,3
3	Осмол	100	24,63	1,23	230	9	6,6
4	Сосновые дрова	100	3,55	—	209	33,4	29,0
5	Сосновые дрова	100	2,85	—	229	37	16,4

Газификация щепы в 1, 2 и 3-м опытах производилась по 2-й схеме, а в 4 и 5-м по 1-й схеме.

Газификации подвергалась сосновая щепа влажностью 16,7—37%. Производительность газогенератора по абс. сух. щепе колебалась в пределах 26,7—37,4 *кг/ч*.

При работе газогенераторной установки по 2-й схеме температура в смолоотделителе была в пределах 58—61°, при этом из газа выпадало конденсата 55—67%. На долю конденсатора-холодильника соответственно приходилось конденсата 33—45%. При проведении опытов по 1-й схеме газ, выходящий из газогенератора, сначала охлаждался до 18—19°, а затем подвергался обессмоливанию. В этих опытах (4 и 5) в смолоотделителе было выделено из газа заметно меньше конденсата (36—39%).

После отстоя суммарного конденсата, полученного при газификации тощего осмола, было получено 24—32% отстойной смолы. При переработке жирного осмола количество отстойной смолы резко увеличивалось (60%). И, наконец, при переработке сосновых дров количество отстойной смолы в суммарном конденсате достигало 12—15%. Выход сырой сосновой смолы (отстойная и всплывная) из тощего осмола достигал 65 *кг/скл. м³*, из жирного осмола 95,7 *кг/скл. м³*, из смеси тощего осмола и сосновых дров 49 *кг/скл. м³* и из сосновых дров до 34—42,5 *кг/скл. м³* (табл. 45).

Из этих данных видно, что при газификации сосновой щепы из дров и осмола, выход сосновой смолы может быть значительно выше, чем при смолокурении кускового осмола, например, в минских ретортах. В этих аппаратах сосновой смолы обычно получается 35—50 *кг/скл. м³* [28], [29].

Таблица 45

Основные показатели газификации сосновой щепы

Показатели	Опыты				
	1	2	3	4	5
Вид перерабатываемого сырья	Осмол (62%), дрова (38%)	Осмол	Осмол	Дрова	Дрова
Относительная влажность газифицируемой щепы, %	31,1	16,7	26,0	33,4	37
Производительность газогенератора по абс. сух. щепе, *кг/ч*	37,4	36,6	26,2	37	29,4
Интенсивность газификации по абс. сух. щепе на уровне фурм периферийного дутья, *кг/м²·ч*	300	293	210	294	235
Температура газа, °С:					
в горловине газогенератора	72	80	90	82	72
в смолоотделителе	58	61	61	18	19
Количество конденсата, %:					
в смолоотделителе	67	55	62	39	36
в конденсаторе-холодильнике	33	45	38	61	64
Содержание в суммарном конденсате после отстоя, %:					
жижки	76	68	40	85	88
всплывной смолы	24	1	60	2	—
отстойной смолы	—	31	—	13	12
Выход сырой смолы (отстойная плюс всплывная) в пересчете на *скл. м³* исходного сырья (количество абс. сух. смолистой древесины 250 *кг/скл. м³*), *кг*	49	65	95,7	42,5	34

Таблица 46

Анализ различных газогенераторных конденсаторов из осмола и сосновых дров

Опыты газификации	Вид перерабатываемого сырья	Конденсаты	Содержание, %					Удельный вес при 20°
			летучих кислот (в пересчете на уксусную)	метилового спирта	эфиров (в пересчете на метилацетат)	растворимой смолы	воды	
1	Щепа из осмола и сосновых дров	Жижка из смолоотделителя	6,9	0,91	0,20	29,8	—	1,140
		Смола из смолоотделителя	5,7	—	—	—	22,0	1,129
		Жижка из конденсатора-холодильника	2,5	0,83	0,35	1,2	—	1,012
2	Щепа из осмола	Жижка из отстойника	6,5	1,2	0,5	22,5	—	1,092
		Отстойная смола из отстойника . .	5,3	—	—	—	18,0	1,124
		Всплывиая смола из отстойника . .	4,1	—	—	—	22,3	1,028
3	Щепа из осмола	Жижка из отстойника	3,96	—	—	31,3	—	1,120
		Всплывная смола из отстойника . .	2,69	—	—	—	15,7	1,110
		Конденсат из очищенного газа, выходящего из смолоотделителя . .	1,49	0,88	0,67	0,47	—	1,012
4	Щепа из сосновых дров	Жижка из отстойника	5,4	0,54	0,75	17,8	—	1,075
		Отстойиая смола из отстойиика . .	5,7	—	—	—	13,0	1,125
		Всплывная смола из отстойника . .	5,2	—	—	—	7,2	1,031
5	Щепа из сосновых дров	Жижка из отстойника	4,15	0,75	0,31	12,1	—	1,058
		Отстойная смола из отстойника . .	3,9	—	—	—	13,2	1,124

Из табл. 46 видно, что жижка как сырье для получения летучих кислот интереса не представляет. Содержание водорастворимой смолы в осмольной жижке высокое и составляет 22,5—31,3%. Содержание растворимой смолы в жижке из сосновых дров ниже (12,1—17,8%). Всплывная и отстойная смолы мало отличаются от газогенераторных смол, получаемых из древесины других пород. Однако у сосновых газогенераторных смол заметна тенденция к понижению влажности. Выход отстойной смолы из сосновых дров составляет 10—12,2%, а из жирного осмола достигает 31,3% (табл. 47). Из этого показателя видно, что сосновая древесина значительно отличается от древесины других пород (береза, осина, ель и др.), из которых, как известно, обычно получается около 7—8% отстойной смолы.

Таблица 47

Выход жидких продуктов при газификации сосновой древесины (в % от абс. сух. щепы)

Продукты газификации щепы	Опыты				
	1	2	3	4	5
Вид перерабатываемого сырья	Осмол и сосновые дрова	Осмол	Осмол	Сосновые дрова	Сосновые дрова
Летучие кислоты (в пересчете на уксусную)	4,20	4,40	2,73	5,85	4,07
Метиловый спирт	0,72	0,64	0,28	0,58	0,84
Эфиры (в пересчете на метилацетат)	0,20	0,24	0,21	0,81	0,35
Скипидар	—	—	2,50	—	—
Смола	25,0	32,0	39,33	30,2	23,2
В том числе:					
отстойная	11,7	16,5	31,30	12,2	10,0
растворимая	13,3	15,5	8,03	18,0	13,2

Данные, приведенные в табл. 48, указывают на то, что теплота сгорания газа из сосновых дров несколько повышалась и резко падала для газа из жирного осмола. Видимо, значительного пиролиза смолистых веществ осмольной щепы не происходило, и поэтому газ не обогащался продуктами их разложения.

В табл. 49 приведен материальный баланс по элементам при газификации щепы из жирного осмола, а в табл. 50 — общие материальные балансы при газификации осмольной щепы и щепы из сосновых дров.

Таблица 48

Состав и выход газа при газификации осмола и сосновых дров

Показатели	Опыты				
	1	2	3	4	5
Вид перерабатываемого сырья	Осмол и сосновые дрова	Осмол	Осмол	Сосновые дрова	Сосновые дрова
Расход воздуха в пересчете на абс. сух. щепу, *нм³/кг*	—	0,94	1,23	—	1,035
Выход газа в пересчете на абс. сух. щепу, *нм³/кг*	—	1,34	1,51	—	1,50
Состав газа в объемных %:					
CO_2	2,2	5,1	9,4	3,15	4,56
CO	25,1	29,2	16,4	31,6	30,40
CH_4	1,2	1,6	1,4	0,43	1,39
H_2	8,3	8,5	7,7	11,27	9,0
O_2	1,4	0,3	0,8	0,63	0,20
N_2	61,8	54,3	64,3	52,92	54,45

Таблица 49

Материальный баланс на 100 *кг* осмольной щепы влажностью 26% для опыта 3 (в *кг*)

Статьи баланса	C	H	O	N	Зола	Всего
Приход						
Осмольная абс. сух. щепа	38,46	5,62	29,08	—	0,84	74
Влага осмольной щепы	—	2,89	23,11	—	—	26
Дутье	—	—	27,30	89,7	—	117
Итого	38,46	8,51	79,49	89,7	0,84	217
Расход						
Газ	16,28	1,13	31,60	89,7	—	138,71
Всплывная смола	16,21	2,48	9,60	—	—	28,29
Жижка	3,43	1,78	13,40	—	—	18,61
Конденсат очищенного газа:						
нижний водяной слой	1,00	3,00	22,50	—	—	26,50
верхний слой — скипидар	1,54	0,20	0,10	—	—	1,84
Зола	—	—	—	—	0,84	0,84
Невязка	—	—0,08	+2,29	—	—	+2,21
Итого	38,46	8,51	79,49	89,7	0,84	217

Таблица 50

Материальный баланс на 100 *кг* сосновой щепы

Статьи материального баланса	Опыт 2 (щепа из осмола)		Опыт 5 (щепа из сосновых дров)	
	кг	%	*кг*	%
Приход				
Щепа, загружаемая в газогенератор	392	50	584	54
Дутье	396	50	490	46
Итого	788	100	1074	100
Расход				
Газ	510	64,8	645	60,3
Суммарный конденсат	260	33,0	411	38,0
Паровая фаза чистого газа	6	0,7	11	1,0
Зола	4	0,5	3	0,3
Невязка	8	1,0	4	0,4
Итого	788	100	1074	100

Из табл. 51 видно, что при газификации жирного осмола к. п. д. газогенератора по жидким продуктам в 2,5 раза больше, чем по газу. На менее смолистом осмоле к. п. д. по жидким продуктам составлял 50%, т. е. выше к. п. д. по газу примерно на 40%. При газификации щепы из сосновых дров к. п. д. газогенератора по газу несколько превышал к. п. д. по жидким продуктам.

Таблица 51

Тепловой баланс газогенератора при газификации сосновой щепы

Расходные статьи теплового баланса	К. п. д. газогенератора, %		
	опыт 2 (щепа из осмола)	опыт 3 (щепа из осмола)	опыт 5 (щепа из сосновых дров)
Теплота сгорания газа (высшая)	35	24	41
Теплота сгорания жидких продуктов (высшая)	50	61	38
Невязка и потери при газификации	15	15	21

Из осмольной отстойной смолы (опыт 2) производилась отгонка острым паром скипидара-сырца, количество которого от исходной смолы получилось 3,2%. Скипидар-сырец подвергался

очистке 10%-ным известковым молоком при кипячении смеси с обратным холодильником, после чего скипидар вновь отгонялся острым паром. При этом получено 41% очищенного скипидара (от сырца).

По ряду показателей газогенераторный скипидар-сырец и скипидар, очищенный известковым молоком, не удовлетворяли техническим условиям на кустарный ретортный скипидар (табл. 52).

Таблица 52

Анализ скипидара-сырца и очищенного скипидара

Показатели	Нормы РТУ БССР 912 — 63	Скипидар-сырец	Скипидар, очищенный известковым молоком
Цвет	От красного до темно-красного	Красный	Светло-желтый
Прозрачность	Допускается слабая муть	Прозрачный	Прозрачный
Удельный вес при 20°	0,895	0,939	0,883
Содержание воды, %	0,50	0,99	0,40
Преломление D°	1,472—1,490	1,503	1,493
Объем отгона, %:			
до 155°	8—12	12,5	12,3
до 190°	81—85	54,0	64,5

Более полное представление о скипидаре, отогнанном из газогенераторной смолы, по сравнению с типичным сухоперегонным скипидаром, полученным из белорусского осмола в минских ретортах, дает табл. 53. Значительное количество компонентов в образцах еще остается неизвестным. Кроме того, по химическому составу газогенераторный скипидар значительно отличается от обычного ретортного. При исследовании из обеих скипидаров отгоняли фракции до 190° и производили анализ этих отгонов при помощи хроматографа «Grom-2» ((Чехословакия). В качестве жидкой среды использовался ланолин.

При промывке горячей водой полученных сосновых смол обычно наблюдаемого значительного понижения влажности промытой смолы (из древесины других пород) не происходило.

Кислотность промытой смолы по сравнению с исходной заметно падала, что вполне закономерно и соответствует наблюдениям при промывке лиственных газогенераторных отстойных смол. Содержание растворимой смолы в исходной сырой сосновой газогенераторной смоле колебалось в пределах 8—18%. Эти данные указывают на то, что сосновые смолы отличаются от обычных газогенераторных смол пониженным содержанием в них водорастворимых смол. Видимо, содержащиеся в сосновой

Таблица 53

Сравнительные исследования скипидаров на хроматографе «Grom-2»

Компоненты	Газогенераторный скипидар, отогнанный от смолы острым паром	Сухоперегонный скипидар, полученный при смолокурении в минских ретортах
Количество компонентов	59	43
В том числе, %:		
α-пинен	4,3	29,3
камфен	3,0	3,0
β-пинен	2,7	2,3
Δ^3-карен	4,2	10,8
дипентен	16,4	14,5
п-цимол	4,0	12,4
циклофенхен	9,0	0,5
борнилен	10,5	1,4
α-фенхен	3,7	0,4
Итого	57,8	74,6

смоле канифольные вещества способствуют лучшему отделению жижки от смолы.

Сосновые газогенераторные смолы оказались вполне удовлетворительными мягчителями для промышленной регенерации резины (табл. 54). Разгонка промытых сосновых смол, проводимая при атмосферном давлении, показала, что смолы, полученные при газификации осмола, имеют более высокую конечную температуру отгонки масел (310—320°), чем смола из дров (270—305°). Здесь, очевидно, сказалось влияние повышенного содержания в смоле канифольных продуктов. Выход масел при разгонке осмольной смолы больше, чем из дровяной (соответственно 56,8—68,3 и 49,2—53,3%). В смоле из осмола содержание нейтральных веществ заметно повышено (24,2—27,3%), а из сосновых дров оно несколько ниже (15,6—21,4%). Тут, очевидно, сказалось влияние повышенного количества терпенов в исходной осмольной щепе.

Количество фенолов от веса абс. сух. отстойной смолы, полученной из осмола и сосновых дров, почти одинаково (24—26%) и примерно равно количеству, получаемому при разгонке смол из древесины других пород. Указанное содержание фенолов в смоле можно считать условным. Так, в фенолах для опыта 2, проведенного на осмольной щепе, содержание смоляных кислот

Таблица 54

Анализ сосновых газогенераторных смол по ТУ на мягчитель для регенерации резины (см. табл. 26)

Опыт газификации	Вид перерабатываемого сырья	Смола, промытая горячей водой	Влажность смолы, %	Удельный вес при 20°	Механические примеси, %	Растворимые кислоты (в пересчете на уксусную), %	Вещества, не растворимые в бензине, %	Смоляные кислоты, %
1	Щепа из осмола и сосновых дров	Из смолоотделителя	10,5	1,10	1,00	2,45	41,3	21,5
2	Щепа из осмола	Из отстойника	26,7	1,084	0,39	0,93	26,1	30,1
3	Щепа из осмола	Всплывная из отстойника	18,1	1,047	—	0,24	21,6	27,6
4	Щепа из сосновых дров	Отстойная из отстойника	10,5	1,126	1,80	1,41	44,2	25,6
		Всплывная из отстойника	7,0	1,123	0,40	1,50	50,6	28,5
5	Щепа из сосновых дров	Отстойная из отстойника	14,0	1,110	1,05	1,66	48,8	23,3

(определяемых осаждением их хлористым барием) доходило до 46,4%.

По данным разгонок и анализа масел, содержание карбоновых кислот в смоле из осмола в среднем составляло 5,5%, а из сосновых дров 3%.

Можно предполагать, что при газификации щепы канифольные продукты будут в какой-то степени поступать в газ, а потом вместе со смолой выделяться смолоотделителем. Для проверки этого были проведены соответствующие исследования, заключающиеся в том, что из смолы выделялась канифоль.

Промытую горячей водой всплывную смолу, полученную из осмола, растворяли в бензине при кипячении с обратным холодильником. В полученной мисцелле содержалось около 5% растворенных веществ. Бензиновый раствор смолы после его охлаждения фильтровали. Из фильтрата производили отгонку растворителя до содержания в нем 50% растворенных веществ. К упаренной бензиновой мисцелле при интенсивном помешивании добавляли 10%-ный раствор едкого натра. Бензиновый раствор неомыляемых веществ отделяли от канифольного мыла и фенолятов отстаиванием. Раствор солей и фенолятов обрабатывали 5%-ным раствором серной кислоты. Выделившиеся высокомолекулярные кислоты и фенолы извлекали серным эфиром. Из эфирной вытяжки, предварительно обработанной хлористым кальцием, отгоняли эфир. Остаток после отгонки эфира растворяли при нагревании в небольшом количестве бензина. Полученный бензиновый раствор разбавляли бензином до 5%-ной концентрации. При этом из раствора выпадал смолистый осадок. После его отделения к прозрачному бензиновому раствору смоляных веществ добавляли фурфурол.

При тщательном перемешивании смеси на холоде происходило осветление бензинового раствора. Для более полного отделения фенолов от смоляных и жирных кислот к бензиновому раствору добавляли 4%-ный раствор соляной кислоты и фурфурол. При 2-часовом нагревании смеси с обратным холодильником и непрерывном перемешивании ее происходило образование не растворимого в бензине осадка. После его отделения производили 3-кратную промывку бензинового раствора водой, затем бензин отгоняли. Полученный продукт, принимаемый за смесь канифоли и жирных кислот, обрабатывали паром, после чего высушивали при температуре 150—160°.

Количество канифольных продуктов, считая от веса абс. сух. исходной смолы, полученной при газификации осмола, в 1-м опыте составило 21,7%, а во 2-м опыте 18%. Средние пробы щепы для того и другого опытов подвергали экстракции кипящим бензином в лабораторных условиях, а затем из мисцеллы выделяли канифоль, выход которой составил для щепы 1-го опыта 5,84% (от веса абс. сух. щепы), а для 2-го опыта 6,5%.

Следовательно, канифоли через газогенераторную смолу получено почти в 2 раза меньше: в 1-м опыте 2,6%, а во 2-м опыте 2,9%.

Из табл. 55 видно, что по основным показателям канифоли из смолы и из щепы близки одна к другой.

Таблица 55

Анализ канифоли, полученной из газогенераторной смолы и из щепы

Показатели	Опыт 1 (щепа из осмола и сосновых дров)		Опыт 2 (щепа из осмола)	
Сырье, из которого получена канифоль	Смола	Щепа	Смола	Щепа
Температура размягчения, °С	—	43	—	45
Кислотное число	128	124	138	115
Вещества, не растворимые в петролейном эфире, %	2,91	11,8	4,3	22,4
Неомыляемые вещества, %	14,5	10,2	7,6	11,7
Смоляные кислоты, %	55,8	63,8	58,0	42,5
Жирные кислоты, %	13,3	12,3	34,4	17,4

Отметим, что канифоль из смолы не была хрупкой, и температуру размягчения в обычных лабораторных условиях определить не удалось.

В канифоли, полученной при экстракции щепы бензином, содержалось абиетиновой кислоты (определяемой спектрофотометром Ф-4А) 37,1—37,8%, а в канифоли из смолы 32,9—34,5%. Цифры довольно близкие.

Водорастворимая смола из жижки, полученной при газификации осмола, почти не отличается от смолы из еловой щепы. При исследовании жижки из осмольной щепы (опыт 2) получили следующие результаты. Растворимость смолы жижки в серном эфире 29,6%. В эфирорастворимой смоле содержалось 52% фенолов, 2,44% нейтральных веществ, 8,9% карбоновых кислот. Количество условного пирокатехина от веса эфирорастворимых фенолов составило 56%. При анализе смолы, оставшейся в водном растворе после экстракции веществ из жижки эфиром (эфиро-воде), установлено, что в ней содержалось 39% левоглюкозана, или в пересчете на всю растворимую смолу 27,5%.

8. ВЫХОД ПРОДУКТОВ ПРИ ГАЗИФИКАЦИИ ЩЕПЫ ИЗ СОСНОВЫХ ПНЕЙ ТОРФОПРЕДПРИЯТИЙ

На торфяных разработках ежегодно накапливаются сотни тысяч кубометров сосновых пней. Сбыта указанная древесина не имеет, хотя есть ряд предложений в этом направлении [32],

[33]. Иногда пни частично используют в качестве топлива. Организация промышленной энергохимической переработки болотного пня позволит в значительной степени обеспечить соответствующие производства хвойной пирогенной смолой [34].

Для опытов были использованы болотные сосновые пни шуваловского торфопредприятия Ленинградской области и смолявических торфяников БССР, которые после разделки измельчались в рубильной машине.

Элементарный состав древесины болотного осмола мало отличается от обычной древесины (табл. 56).

Таблица 56

Элементарный состав болотного осмола (в %)

Торфопредприятие	C	H	O	Зола
Шуваловское	49,2	6,8	42,5	1,5
Смолявическое	52,8	6,9	39,3	1,0

Насыпной вес щепы влажностью 12,5% из шуваловского осмола равен 155 *кг/м*³. Древесину болотного пня можно отнести к категории тощего осмола. Но этот осмол несколько отличается от стволовой древесины сосны меньшим содержанием целлюлозы и пентозанов (табл. 57), по-видимому частично разрушающихся под действием микроорганизмов.

Таблица 57

Химический состав древесины болотного осмола

Составные части	Содержание в % от веса абс. сух. осмола	
	шуваловских торфяников	смолявических торфяников
Целлюлоза по азотно-спиртовому методу . . .	42,8	39,0
Лигнин по сернокислотному методу	26,8	27,5
Пентозаны	6,0	10,5
Полиуроновые кислоты	2,3	5,7
Вещества, растворимые в горячей воде	4,2	1,6
Вещества, растворимые в серном эфире	11,0	6,3
Вещества, растворимые в спирто-бензольной смеси (1 : 1)	12,4	11,1
Метоксильные группы (—OCH_3)	5,4	3,5
Зола	1,5	1,0
Легкогидролизуемые вещества (РВ)	14,5	10,1

Опыт газификации щепы производили по 2-й схеме, по которой охлаждению в конденсаторе-холодильнике подвергался обессмоленный газ.

Из табл. 58 видно, что из сухой щепы болотного осмола получилось 240—290 *кг/пл. м*³ суммарного газогенераторного конденсата, а из сырой 530 *кг/пл. м*³. Интенсивность газификации составляла 165—228 *кг/м*²·*ч*.

Таблица 58

Показатели газификации болотного осмола

Показатели	Осмол шуваловских торфяников	Осмол смолявических торфяников в опытах		
		1	2	3
Относительная влажность газифицируемой щепы, %	12,5	44,7	17,4	20,0
Средневзвешенный весовой размер щепы (по абс. сух. древесине), *г*	2,5	0,4	0,4	0,7
Интенсивность газификации по абс. сух. щепе на уровне фурм периферийного дутья, *кг/м*²·*ч*	175	165	228	206
Состав газа в горловине газогенератора, объемные %:				
CO_2	8,7	9,4	5,0	4,0
CO	26,2	22,1	30,0	26,8
CH_4	1,9	1,2	0,4	2,2
H_2	9,7	9,2	11,4	6,7
O_2	0,6	0,9	1,4	0,9
N_2	52,9	57,2	51,8	59,4
Средняя температура, °С:				
дутья	14	8	11	15
газа в горловине газогенератора	121	72	81	87
газа после смолоотделителя	57	64	53	55
газа после конденсатора-холодильника	—	18	23	24
Выход суммарного конденсата в пересчете на 1 *пл. м*³ осмола, *кг* (в 1 *пл. м*³ содержится 450 *кг* абс. сух. осмола)	290	530	240	290
В том числе:				
из смолоотделителя	173	370	144	151
из конденсатора-холодильника	117	160	96	139

Средняя температура газа на выходе из газогенератора для сухой щепы равнялась 121°, а для более влажной 72—87°. Температура газа после смолоотделителя находилась в пределах 53—64°. Обессмоленный газ окончательно охлаждался до 18—24°.

Таблица 59

Анализ конденсатов, полученных при газификации щепы из болотного осмола

Составные части продуктов газификации болотного осмола	Осмол шуваловских торфяников	Осмол смолявических торфяников в опытах		
		1	2	3
Относительная влажность газифицируемой щепы, %	12,5	44,7	17,4	20
Конденсат из смолоотделителя после отстоя и разделения жижки, %:				
жижка	35	75	17	15
всплывная смола	65	15	56	59
осадочная смола	—	10	17	26
Жижка, %:				
летучие кислоты (в пересчете на уксусную)	4,2	2,31	5,65	4,36
растворимая смола	51,35	12,75	36,77	42,50
метиловый спирт	0,10	0,16	0,10	0,16
эфиры (в пересчете на метилацетат)	0,56	—	—	—
другие органические вещества	3,09	1,18	1,08	1,12
Удельный вес при 20°	1,209	1,061	1,158	1,141
Всплывная смола, %:				
летучие кислоты (в пересчете на уксусную)	1,34	0,80	1,33	2,77
влажность	12,00	0,81	3,28	—
Удельный вес при 20°	1,105	1,013	1,018	1,024
Осадочная смола, %:				
летучие кислоты (в пересчете на уксусную)	—	1,57	2,97	3,4
влажность	—	3,90	14,2	18,1
Удельный вес при 20°	—	1,086	1,172	1,162
Конденсат из очищенного газа, %:				
летучие кислоты (в пересчете на уксусную)	2,79	0,93	1,92	2,44
растворимая смола	0,85	0,40	0,95	1,50
метиловый спирт	0,60	0,48	0,72	0,46
эфиры (в пересчете на метилацетат)	1,10	—	—	—
другие органические вещества	5,16	1,99	2,51	0,60
Удельный вес при 20°	1,013	1,006	1,014	1,016

В жижке смолоотделителя (табл. 59) содержалось 12,75—51,35% растворимой смолы. Конденсат, выделенный из очищенного газа, содержал 0,46—0,72% метилового спирта, а жижка смолоотделителя 0,10—0,16%.

По данным табл. 59 видно, что метиловый спирт легко проходит с газом через газоочистную аппаратуру. Концентрация летучих кислот в конденсате очищенного газа низкая (0,93—2,79%). Количество растворимой смолы в этом конденсате весьма небольшое (0,4—1,5%), что указывает на вполне удовлетворительное обессмоливание газа в смолоотделителе.

По данным табл. 60 выходы летучих кислот и метилового спирта для всех опытов близки между собой. Суммарный выход смолы составлял 26,8—28,7%. При этом выход растворимой смолы колеблется от 2,6 до 10,3%. Наиболее ценной смолы (всплывной и осадочной) получается значительное количество (18,3—26%).

Таблица 60

Расход воздуха, выход газа и жидких продуктов при газификации щепы из болотного осмола

Показатели	Осмол шуваловских торфяников	Осмол смолявических торфяников в опытах		
		1	2	3
Относительная влажность газифицируемой щепы, %	12,5	44,7	17,4	20
Расход воздуха в пересчете на абс. сух. щепу, *нм³/кг*	0,87	1,25	1,06	1,26
Выход газа в пересчете на абс. сух. щепу, *нм³/кг*	1,30	1,73	1,61	1,68
Выход жидких продуктов в пересчете на абс. сух. щепу, %:				
летучие кислоты (в пересчете на уксусную)	1,67	1,94	1,18	1,83
метиловый спирт	0,20	0,26	0,16	0,15
эфиры (в пересчете на метилацетат)	0,40	—	—	—
смола	28,6	27,7	26,8	28,7
В том числе:				
растворимая смола	10,3	7,9	2,6	2,7
всплывная смола	18,3	12,3	16,8	19,2
осадочная смола	—	7,5	7,4	6,8

Из материального (по элементам) баланса одного из опытов (табл. 61) видно, что меньшая весовая часть древесины перешла в газ $\left(\frac{135,14-97,8}{87,5}\cdot 100=43\%\right)$.

Потенциальный тепловой энергии щепы находилось в газе 33%, а в жидких продуктах 46%. Как видно, газогенератор на щепе из болотного осмола работал для генерации главным образом жидких продуктов, а не газа.

Таблица 61

Материальный баланс на 100 *кг* газифицируемой щепы из болотного осмола шуваловского торфопредприятия (в *кг*)

Статьи баланса	C	H	O	N	Зола	Всего
Приход						
Щепа абс. сух.	43	5,95	37,24	—	1,31	87,5
Влага щепы	—	1,39	11,11	—	—	12,5
Дутье	—	—	22,80	75	—	97,8
Итого	43	7,34	71,15	75	1,31	197,8
Расход						
Газ	22,38	1,36	36,40	75	—	135,14
Жижка	2,84	1,13	7,63	—	—	11,60
Всплывная смола	16,33	2,05	3,62	—	—	22,00
Конденсат очищенного газа	1,45	2,42	18,83	—	—	22,70
Зола	—	—	—	—	1,31	1,31
Невязка	—	+0,38	+4,67	—	—	+5,05
Итого	43,00	7,34	71,15	75	1,31	197,8

Всплывная и осадочная смолы из болотного осмола по ряду показателей не уступают кустарным сосновым смолам, получаемым из борового осмола при смолокурении (табл. 62).

Тепловой баланс при газификации щепы из болотного осмола шуваловского торфопредприятия (в %)

Приход

Теплота сгорания щепы (высшая)	100

Расход

Теплота сгорания газа (высшая)	33
Теплота сгорания (высшая) органических веществ, содержащихся:	
в жижке	8
в всплывной смоле	35
в конденсате очищенного газа	3
Потери тепла при газификации и невязка	21
Итого	100

Анализ газогенераторной смолы, полученной при газификации болотного осмола, как мягчителя для регенераторной промышленности (см. табл. 26)

Образец отстойной смолы	Влажность, %	Удельный вес при 20°	Механические примеси, %	Водорастворимые кислоты, %	Вещества, не растворимые в бензине, %	Смоляные кислоты, %
Газогенераторная смола из болотного осмола:						
всплывная (шуваловские торфяники)	5—12	1,048—1,105	0,2—0,85	1,26—2,3	4,5—13	32,5—34,5
всплывная (смолявнческие торфяники)	0,2—3,3	1,013—1,024	0,4	0,7—1,4	1,4—3,2	27,2—29,5
осадочная (смолявические торфяники)	4—20	1,086—1,169	0,1	0,7	7,5	23,2—32,3
Кустарные сосновые смолы, получаемые из борового осмола при смолокурении в ретортах и печах . .	3—18	1,08—1,13	0,5	1—2,5	4—19	27—37

Смола, полученная при газификации осмола шуваловских торфяников, испытывалась в производстве. В результате этих исследований было сделано заключение, что по технологическим свойствам смола из болотного осмола приближается к лучшим печным сосновым смолам, применяемым в регенераторной промышленности в качестве мягчителей.

9. ВЫХОД ПРОДУКТОВ ПРИ ГАЗИФИКАЦИИ ЕЛОВОЙ КОРЫ

Утилизация получающейся при окорке бревен коры представляет большой интерес. Количество ее равно примерно 10% объема древесины.

Для опытов была использована еловая кора двух образцов. Первый образец получен от окорки сплавных бревен, а второй от бревен сухопутной доставки [30]. Кора представляла собой длинные и узкие куски, напоминающие ремни, измельчение которых производилось в обычной силосорезке. Средневзвешенный размер измельченной коры составил 32 *мм*. Средняя проба сплавной коры имела следующий элементарный состав (в %): углерода 44,25, водорода 5,9, кислорода 44,25, золы 5,6.

Таблица 63

Химический состав еловой коры (на абс. сух. навеску в %)

Составные части коры	Кора, полученная при окорке еловых бревен	
	сплавных	сухопутной доставки
Целлюлоза по азотно-спиртовому методу	25,8	22,8
Лигнин по сернокислотному методу	31,4	30,3
Пентозаны	10,1	7,9
Полиуроновые кислоты	8,3	8,1
Вещества, растворимые в горячей воде	9,7	20,3
Вещества, растворимые в серном эфире	4,0	6,8
Вещества, растворимые в спирто-бензольной смеси (1 : 1)	9,8	22,4
Метоксильные группы ($—OCH_3$)	2,8	3,3
Зольность	5,6	2,1
Легкогидролизуемые вещества (РВ)	17,7	16,3

Из табл. 63 видно, что сплавная кора значительно отличается от коры сухопутной доставки по количеству веществ, экстрагируемых горячей водой и органическими растворителями. Очевидно, значительное количество этих веществ растворилось в воде во время сплава. Использованная для опытов кора по ряду показателей значительно отличается от древесины хвойных пород, что соответствует другим исследованиям [23]. Например,

в еловой древесине содержится примерно 50% целлюлозы, а в коре ее оказалось почти в 2 раза меньше. По содержанию пентозанов, лигнина, легкогидролизуемых веществ кора мало отличается от древесины. Очень высокая зольность сплавной коры объясняется наличием в ней механических примесей (песок).

Газификация коры производилась по 1-й схеме. Некоторые показатели этих опытов приведены в табл. 64.

Таблица 64

Показатели газификации еловой коры

Показатели	Опыты газификации коры			
	сплавной		сухопутной доставки	
	1	2	3	4
Относительная влажность коры, %	21,5	48	20	25
Насыпной вес коры, *кг/м*³	130	220	134	140
Интенсивность газификации по абс. сух. коре, *кг/м*²·*ч*	120	100	147	230
Температура, °С:				
газа в горловине газогенератора	90	84	85	86
газа после смолоотделителя	38	70	18	28
дутья	6	14	25	17
Выход суммарного конденсата в пересчете на 1 *пл. м*³ коры, *кг* (в 1 *пл. м*³ содержится 550 *кг* абс. сух. коры)	240	333	343	280
В том числе:				
отстойной смолы	63 (26%)	35 (10%)	58 (17%)	100 (36%)
жижки	177 (74%)	298 (90%)	285 (83%)	180 (64%)
Выход измельченной коры из 1 *пл. м*³ коры, *м*³	5,35	4,82	5,15	5,23

Выход суммарного конденсата в зависимости от температурного режима работы установки и влажности исходной коры равнялся 240—343 *кг/пл. м*³, а отстойной смолы 35—100 *кг/пл. м*³.

Из сухой коры выход отстойной смолы был больше, чем из сырой.

Выход измельченной коры из 1 *пл. м*³ равен примерно 5 *нас. м*³, тогда как из 1 *пл. м*³ древесины выход щепы равен 3 *нас. м*³.

Температура воздуха, применяемого при газификации коры, 6—25°. Температура газа, выходящего из газогенератора, во всех опытах колебалась в пределах 84—90°.

Давление дутья перед газогенератором составляло 10—30 *мм* вод. ст. В горловине газогенератора поддерживалось разрежение, равное 2—4 *мм* вод. ст. Из приведенных данных видно,

Таблица 65

Анализ конденсатов и газа, полученных при газификации еловой коры

Составные части	Опыты газификации коры			
	сплавной		сухопутной доставки	
	1	2	3	4
Относительная влажность газифицируемой коры, %	21,5	48	20	25
Жижка, %:				
летучие кислоты (в пересчете на уксусную)	4,3	2,55	5,1	6,0
растворимая смола	11,0	7,4	9,4	10,5
метиловый спирт	0,1	0,3	—	1,2
эфиры (в пересчете на метилацетат)	—	—	0,52	0,4
другие органические вещества	2,3	2,92	1,01	1,66
Удельный вес при 20°	1,04	1,03	1,048	1,04
Отстойная смола, %:				
летучие кислоты (в пересчете на уксусную)	2,7	1,05	3,4	5,1
влажность	13,6	17,80	13,9	30,7
Удельный вес при 20°	1,114	1,078	1,122	1,130
Конденсат очищенного газа:				
содержание конденсата в очищенном газе после смолоотделителя, *г/нм*³	60	360	20	30
летучие кислоты (в пересчете на уксусную,) %	3,5	1,48	—	—
растворимая смола, %	0,32	0,30	—	—
метиловый спирт, %	1,03	1,68	—	—
другие органические вещества, %	2,21	3,24	—	—
Удельный вес при 20°	1,041	1,004	—	—
Состав газа, объемные %:				
CO_2	5,0	7,6	7,3	3,2
CO	23,4	20,6	22,2	24,2
CH_4	0,8	1,8	1,2	1,2
H_2	5,6	6,8	9,1	6,2
O_2	0,4	0,6	0,2	1,5
N_2	64,8	62,6	60,0	63,7

что слой коры в газогенераторе высотой 1200 *мм* создавал гидравлическое сопротивление примерно 12—34 *мм* вод. ст.

Жижка из коры значительно отличается от жижки, получаемой при газификации древесины хвойных пород. Так, содержание летучих кислот в ней в 1,5—2, а растворимой смолы в 2—3 раза меньше, чем в древесной.

По влажности и кислотности отстойная смола из коры почти не отличается от смолы, получаемой при газификации древесины.

Анализ конденсатов и газа, полученных из коры, приведен в табл. 65.

Таблица 66

Выход продуктов при газификации еловой коры (в пересчете на абс. сух. кору)

Продукты газификации еловой коры	Опыты газификации коры			
	сплавной		сухопутной доставки	
	1	2	3	4
Относительная влажность газифицируемой коры, %	21,5	48	20	25
Выход газа, *нм*³/*кг*	2,05	2,09	1,98	1,92
Расход воздуха *нм*³/*кг*	1,68	1,65	1,50	1,55
Выход жидких продуктов, %:				
летучих кислот (в пересчете на уксусную)	2,25	3,52	3,0	2,90
метилового спирта	0,18	1,48	—	0,61
растворимой смолы (безводной)	3,84	4,25	4,9	4,95
отстойной смолы (безводной)	9,60	5,20	8,7	10,20

Из табл. 66 видно, что выход газа из коры довольно высокий (1,92—2,09 *нм*³/*кг*), причем влажность исходной коры на выходе газа почти не сказывается. Увеличение влажности газифицируемой коры оказывает влияние на выход растворимой смолы, летучих кислот и метилового спирта. При этом наблюдается тенденция к повышению выходов этих продуктов, тогда как при газификации сырой древесины выход их падает. При значительном увеличении влажности коры почти в 2 раза уменьшается выход отстойной смолы.

В табл. 67 приведен материальный баланс для 2-го опыта газификации коры. Данные материального баланса указывают на то, что в газ перешло газифицируемого сырья, считая от веса абс. сух. коры, $(132{,}08-110{,}7) : 0{,}52 = 41\%$, т. е. в 2,3 раза больше, чем в органические жидкие продукты.

Тепловой к. п. д. газогенератора по газу для этого опыта составил 49,5%, а к. п. д. по жидким продуктам 28,5%. Из этих

Таблица 67

Материальный баланс на 100 *кг* коры относительной влажностью 48% (в *кг*)

Статьи баланса	C	H	O	N	A (зола)	Всего
Приход						
Кора абс. сух.	23	3,07	23,00	—	2,93	52,0
Влага коры	—	5,33	42,67	—	—	48,0
Дутье	—	—	25,70	85	—	110,7
Итого	23	8,40	91,37	85	2,93	210,7
Расход						
Газ	17,36	1,02	28,70	85	—	132,08
Жижка	2,30	2,97	23,03	—	—	28,30
Отстойная смола . . .	2,34	0,29	0,77	—	—	3,40
Конденсат очищенного газа	1,00	4,35	34,15	—	—	39,50
Зола	—	—	—	—	2,93	2,93
Невязка	—	—0,23	+4,72	—	—	+4,49
Итого	23,00	8,40	91,37	85	2,93	210,7

данных видно, что полезно используемого тепла перешло в газ примерно в 1,7 раза больше, чем в жидкие продукты. Примерно такая же картина наблюдалась при газификации сухой коры. В табл. 68 приведен материальный баланс для опыта 3. В этом случае в газ перешло 37% абс. сух. коры, а в жидкие органические продукты около 17%, т. е. в 2,2 раза меньше. Тепловой к. п. д. газогенератора по газу для опыта 3 равнялся 50%, а по жидким органическим продуктам 27%, т. е. в 1,85 раза ниже.

Дважды промытая горячей водой отстойная смола из сплавной коры содержала 4,8% воды и 0,86% летучих кислот.

Разгонка при атмосферном давлении до температуры 280—310° показала, что эта смола значительно отличается от древесной.

Количество веществ, отгоняемых до 110°, равнялось 31,9%, тогда как из газогенераторных древесных смол эта фракция составляет обычно 5—6%.

Выход пека при разгонке смолы небольшой (26,5%) и примерно вдвое меньше, чем из древесных смол.

Выход масел от веса безводной смолы равен 72,1%. Количество нейтральных веществ в этих маслах 52,8%.

В маслах содержалось 22% фенолов и 3,1% карбоновых кислот. При анализе промытой смолы без предварительной разгонки получили следующие продукты (в % от веса безводной навески): фенолы (включая высокомолекулярные кислоты) 42,3; нейтральные вещества 34,5; карбоновые кислоты 8,3.

Таблица 68

Материальный баланс на 100 *кг* коры влажностью 20%

Статьи баланса	Количество	
	кг	%
Приход		
Кора при рабочей влажности	100	39
Дутье	155	61
Итого	255	100
Расход		
Суммарный конденсат	50	19,6
Газ	185	72,5
Паровая фаза охлажденного газа	3,2	1,3
Зола	2,9	1,1
Невязка	+13,9	+5,5
Итого	255	100

Отстойная смола из коры по основным показателям удовлетворяет требованиям, предъявляемым к мягчителю, используемому в химической промышленности при регенерации резины. Так, при исследовании указанной смолы были получены следующие результаты (в %): влажность 3—6; механических примесей 0,8—3; водорастворимых кислот (в пересчете на уксусную) 0,8—3,2; веществ, не растворимых в бензине, 20—33; смоляных кислот 16—22; удельный вес при 20° 1,06—1,07 (см. табл. 26).

При исследовании отстойной смолы по методике ГОСТ 3350—54 установлено, что смола, полученная из коры, как мягчитель приближается по качеству к смолам, получаемым при газификации сосновой древесины.

Предварительные исследования газогенераторной смолы, получаемой из коры, как антисептика для древесины показали, что она достаточно токсична по отношению к дереворазрушающему грибу «Coniophore cerebella» и плохо вымывается горячей водой после пропитки древесины. Газогенераторная смола из коры может быть использована в дорожном строительстве для укрепления верхнего покрытия дорог при добавлении к суглинистым и супесчаным грунтам 6—8%.

10. ВЫХОД ПРОДУКТОВ ПРИ ГАЗИФИКАЦИИ ОСИНОВОЙ КОРЫ

Для опыта была использована кора, полученная при окорке осиновых дров одного из лесопунктов Новгородского лесокомбината, заготовляющего осиновые балансы для целлюлозных предприятий Ленинградской обл.

Измельчение сухой осиновой коры производилось в рубильной машине ДР-3. Средневзвешенный размер измельченного исходного сырья равен 21 *мм*.

Химический состав осиновой коры, использованной для опытов, был следующий (в %): целлюлозы по азотно-спиртовому методу 21,2; лигнина по сернокислотному методу 36,6; пентозанов 15,4; полиуроновых кислот 10,6; метоксильных групп 4; веществ, растворимых в горячей воде, 20,3; веществ, растворимых в эфире, 14,8; веществ, растворимых в смеси спирта и бензола (1 : 1), 27,2; золы 2,8; легкогидролизуемых веществ (РВ) 11,7.

Из приведенных данных видно, что химический состав используемой коры по ряду показателей отличается от данных, имеющихся в литературе [23]. Например, в коре, используемой для газификации, находилось больше целлюлозы, полиуроновых кислот, пентозанов и лигнина.

При проведении опыта выяснилось, что работа газогенераторной установки по 1-й схеме оказалась невозможной. При охлаждении газа на стенках конденсатора-холодильника осаждалась смола, не обладающая текучестью и содержащая твердые частицы, напоминающие по консистенции парафин. В результате внутренняя поверхность конденсатора-холодильника забивалась и работа на установке прекращалась.

Нормальное действие аппаратуры стало возможным при работе установки по 2-й схеме. В этом случае обессмоливанию подвергался неохлажденный газ.

Конденсаты из смолоотделителя и конденсатора-холодильника состояли из легкоподвижной жижки и отстойной твердой (при комнатной температуре) смолы. Поэтому разделение охлажденных отстойной смолы и жижки производилось путем декантации жижки. Основные данные опыта следующие: относительная влажность осиновой коры 14,7%, интенсивность газификации по абс. сух. коре на уровне фурм периферийного дутья 200 *кг/м*^{2} · *ч*. Состав газа по горловине газогенератора (в объемных %): CO_2 — 4,8; CO — 30,6; CH_4 — 1,1; H_2 — 8,9; O_2 — 0,5; N_2 — 54,1. Удельный вес газа 1,174 *кг/нм*^{3}.

Средняя температура (в °С): дутья 18, газа в горловине газогенератора 80, газа после смолоотделителя 47, газа после конденсатора-холодильника 18.

Состав суммарного конденсата после отстаивания (в %): отстойная смола 47, жижка 53.

Анализ отстойной смолы: летучие кислоты (в пересчете на уксусную) 4,2%, влажность 12%, удельный вес при 20° 1,077.

Анализ жижки: летучие кислоты (в пересчете на уксусную) 6,1%, растворимая смола 13,3%, метиловый спирт 0,79%, эфиры (в пересчете на метилацетат) 0,31%, удельный вес при 20° 1,058.

Выход суммарного конденсата в пересчете на единицу сырья (количество абс. сух. коры в 1 *пл. м*^{3} принимаем 450 *кг*)

285 *кг/пл.м*^{3}, в том числе: отстойной смолы 134 *кг/пл.м*^{3} и жижки 151 *кг/пл.м*^{3}. Из приведенных данных видно, что в суммарном конденсате находилось большое количество отстойной смолы (47%).

Жижка по содержанию в ней органических веществ может представлять интерес лишь для получения растворимых смол, как сырья для дальнейшей переработки. При промывке отстойной смолы горячей водой (80°) отделено 17% растворимой смолы (в пересчете на безводную), перешедшей в раствор.

Выход продуктов в пересчете на абс. сух. осиновую кору следующий (в%): летучие кислоты (в пересчете на уксусную) 3,3, растворимая смола 8,8, отстойная смола 20,5, метиловый спирт 0,5, эфиры (в пересчете на метилацетат) 0,2, реакционная вода 15,2.

Выход газа равен 1,12 *нм*^{3}/*кг* (на абс. сух. кору), а расход воздуха 0,765 *нм*^{3}/*кг*.

Из материального баланса, приведеного в табл. 69, видно, что (112—84) 100:(100—14,7) 100=33% абс. сух. осиновой коры перешло в газ, а большая ее часть в жидкие продукты.

Таблица 69

Материальный баланс газификации на 100 *кг* осиновой коры влажностью 14,7%

Статьи баланса	Количество	
	кг	%
Приход		
Количество коры, загруженной в газогенератор	100	55
Дутье	84	45
Итого	184	100
Расход		
Суммарный конденсат	54	29
Генераторный газ	112	61
Паровая фаза охлажденного газа, поступающего в топку	2	1
Зола, удаленная из газогенератора	2	1
Потери и невязка	+14	+ 8
Итого	184	100

Тепловой к. п. д. газогенератора по газу был равен 30%, а по жидким продуктам значительно больше (47%). Приведенные данные теплового баланса показывают, что на осиновой коре

газогенератор работал для генерации главным образом жидких продуктов, а не газа.

Смола из осиновой коры была подвергнута лабораторной разгонке при атмосферном давлении до различной конечной температуры (рис. 14). Выход масел от веса безводной смолы при отгонке их до температуры 225° равнялся 19%, а пека 62%. При отгонке в пределах 285—294° масел получилось значительно больше (62,7%) и относительно мало пека (26,9%).

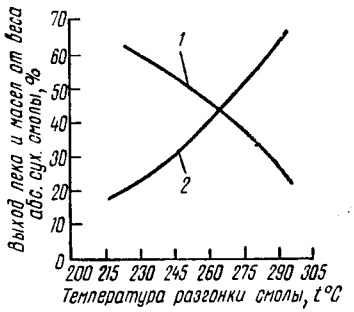


Рис. 14. Выход масел и пека в зависимости от конечной температуры разгонки смолы, полученной при газификации осиновой коры:
1 — пек; *2* — масла

Результаты анализов масел от первой разгонки смолы (конечная температура 225°) и смеси масел двух последних опытов (конечная температура 285—294°) приведены в табл. 70. Из этих данных видно, что при повышении конечной температуры разгонки смолы с 225 до 290° увеличивается степень отгонки нейтральных веществ и карбоновых кислот более чем в 3 раза, а фенолов примерно на 40%.

Характерной особенностью масел, получающихся при разгонке этой смолы, является их высокая подвижность при температуре 10—15° и низкий удельный вес (меньше единицы). Удельный вес исходной смолы составлял 1,077.

Масла, отогнанные от смолы при атмосферном давлении и конечной температуре 285—294°, были промыты горячей водой (80°) и анализировались по ГОСТ 2098. Результаты исследова-

Таблица 70

Выход продуктов при разгонке отстойной смолы из осиновой коры

Средние температурные пределы отгонки масел, °C	Содержание в маслах, %			Выход в пересчете на безводную смолу, %		
	фенолов	нейтральных веществ	карбоновых кислот	фенолов	нейтральных веществ	карбоновых кислот
110—225	40,2	30,4	13,4	10,6 (100%)	8,0 (100%)	3,5 (100%)
110—290	25,3	43,3	20,3	14,7 (140%)	25,1 (315%)	11,8 (340%)

ний, приведенные в табл. 71, показали, что эти масла после промывки их горячей водой по ряду аналитических показателей приближаются к показателям берестового дегтя II сорта.

Таблица 71

Анализ масел, отогнанных из отстойной смолы, полученной при газификации осиновой коры (см. табл. 37)

Показатели	Масла до промывки	Масла после промывки
Удельный вес при 20°	0,967	0,954
Кислотность водяной вытяжки, %	1,81	0,63
Кислотное число	89	50
Число омыления	200	120
Вещества, не растворимые в бензине, %	26	16

В серном эфире растворилось 57% водорастворимой смолы жижки. При анализе экстрагированной части смолы из жижки получены следующие продукты, считая от веса всей растворимой смолы жижки (в %): фенолов 16 (в том числе веществ, осаждаемых уксуснокислым свинцом, в пересчете на условный пирокатехин 10,4); карбоновых кислот 27; нейтральных веществ 1,94. При анализе эфироводы в ней обнаружено левоглюкозана, определяемого поляриметрическим способом, считая от веса всей растворимой смолы жижки, 15,3%.

На основании опытных и аналитических данных можно считать, что с 1 *пл. м*^{3} осиновой коры можно получить 500 *нм*^{3} генераторного газа, пригодного для топливных целей ($Q = 1000$ *ккал/нм*^{3}), 151 *кг* жижки, содержащей 13,3% растворимой смолы и 134 *кг* отстойной сырой смолы. При разгонке этой смолы предварительно промытой горячей водой, можно получить 68 *кг/пл. м*^{3} масел, близких по анализу к дегтю II сорта.

11. ВЫХОД ПРОДУКТОВ ПРИ ГАЗИФИКАЦИИ ХВОЙНЫХ ЛЕСОСЕЧНЫХ ОТХОДОВ, НЕ СОДЕРЖАЩИХ ХВОЮ

В некоторых леспромхозах вырабатывается хвойно-витаминная мука и хвойно-каротиновая паста. Основным сырьем для этого производства служит хвойная лапка, представляющая собой тонкие ветки толщиной от 5 *мм*, содержащие хвою. Крупные сучья и вершинки после удаления с них хвойной лапки являются отходом этого производства. Выход хвойной лапки зависит от породы исходного сырья: у сосны вес хвойной лапки составляет 25%, а вес отходов 75%, у ели соответственно 70 и 30%. Утилизация обесхвоенных веток путем их газификации с получением ценных продуктов представляет интерес.

Для опытов использовались хвойные лесосечные отходы, содержащие смесь еловых и сосновых веток (1 : 1), с которых хвоя была удалена. Отходы доставлялись из учебно-опытного Лисинского лесхоза ЛТА им. С. М. Кирова. Диаметр веток в нижнем отрубе 15—20 *мм*, в верхнем 5—10 *мм*. Длина веток от 300 до 900 *мм*.

В обесхвоенных еловых ветках содержалось 34,4% коры, в сосновых 25,3%. Часть веток перед измельчением высушивалась под навесом. Относительная влажность щепы, использованной для опытов, составляла около 11 и 50%, а вес ее соответственно 236 и 373 *кг/нас. м*^{3}.

Средние пробы еловых и сосновых лесосечных отходов были подвергнуты раздельному исследованию (табл. 72).

Таблица 72

Химический анализ и элементарный состав обесхвоенных лесосечных отходов

Составные части лесосечных отходов	Содержание в % от веса абс. сух. отходов	
	ели	сосны
Целлюлоза по азотно-спиртовому методу	35,6	34,7
Лигнин по сернокислотному методу	32,6	30,36
Пентозаны	14,0	16,1
Полиуроновые кислоты	4,1	4,82
Вещества, растворимые в горячей воде	4,8	7,62
Вещества, растворимые в серном эфире	3,1	5,17
Вещества, растворимые в спирто-бензоле	5,1	8,74
Метоксильные группы (—OCH_3)	2,9	3,1
Легкогидролизуемые вещества (РВ)	12,0	12,0
Элементарный состав:		
углерод	51,6	51,0
водород	5,85	5,75
кислород	41,45	41,85
зола	1,1	1,4

Лесосечные отходы по химическому составу отличались от стволовой древесины тем, что целлюлозы в них содержалось на 25—30% меньше, а пентозанов, полиуроновых кислот, эфирорастворимых веществ было несколько больше.

Золы в лесосечных отходах больше, чем в стволовой древесине, примерно в 2—2,5 раза.

Было проведено четыре опыта. Опыты различались между собой схемами обработки парогазов. В опытах 1 и 2 обработка газогенераторных парогазов производилась по 1-й схеме, при которой газ из газогенератора поступал в конденсатор-холодильник, а затем в смолоотделитель и топку. В опытах 3 и 4, проводи-

мых по 2-й схеме, выходящий из газогенератора газ сначала подвергался обессмоливанию, затем охлаждению, после чего газ поступал в топку. Из табл. 73 видно, что при газификации сырой щепы получается 444—515 *кг/пл. м*^{3} суммарного конденсата. Однако такой конденсат для производства интереса не представляет, так как он сильно разбавлен водой.

Таблица 73

Показатели газификации обесхвоенных лесосечных отходов

Показатели	Опыты			
	1	2	3	4
Схема работы газогенераторной установки	1-я		2-я	
Относительная влажность щепы, %	11,2	51	11,6	48
Расход абс. сух. щепы, *кг/ч*	30,4	16,2	30	22
Интенсивность газификации по абс. сух. щепе на уровне фурм периферийного дутья, *кг/м*$^2 \cdot$ *ч*	244	130	240	176
Выход суммарного конденсата в пересчете на 1 *пл. м*^{3} щепы (в 1 *пл. м*^{3} содержится 450 *кг* абс. сух. отходов)	236	515	233	444
В том числе:				
из смолоотделителя	95 (40%)	134 (26%)	135 (58%)	260 (59%)
из конденсатора-холодильника	141 (60%)	381 (74%)	98 (42%)	184 (41%)

При газификации сырой щепы по 2-й схеме получалось 260 *кг/пл. м*^{3} смоляного конденсата, а из сухой щепы 135 *кг/пл. м*^{3}. В этих опытах конденсаты содержали относительно большее количество смолы и меньшее воды, что для промышленных газогенераторных установок (ГГУ) более желательно, особенно в тех случаях, где не требуется доулавливать кислоту (например, при работе ГГУ в леспромхозах). При проведении указанных опытов температура дутья колебалась в пределах 12—20°. На сухой щепе температура газа, выходящего из газогенератора, составляла 97—111°, в опытах на сырых отходах 72—74°. Газ из газогенератора в опытах 1 и 2 сначала поступал в конденсатор-холодильник, где охлаждался до 20—24°. Охлажденный газ подвергался обессмоливанию в центробежном смолоотделителе. Температура газа при этом немного падала за счет потерь в окружающую среду (19—23°). В опыте 3 и 4 газ, выходящий из газогенератора, сначала подвергался обессмоливанию, поэтому в смолоотделителе температура была 48—53°. Обессмоленный газ

поступал в конденсатор-холодильник, где охлаждался до температуры 24—25°.

В горловине газогенератора разрежение поддерживалось 6—16 *мм* вод. ст. Разрежение перед смолоотделителем, т. е. после регулирующей задвижки, колебалось в пределах 152—170 *мм* вод. ст. При работе установки по 2-й схеме на более нагретом газе (48—53°) выделялось почти одинаковое количество конденсата (58—59%), не зависящее от влажности газифицируемой щепы. При работе установки по 1-й схеме температура в смолоотделителе была более низкая (19—23°) и на долю этого аппарата приходилось 26—40% суммарного конденсата, выделенного из газа. В этом случае сказывалось влияние влажности исходной щепы.

Анализ конденсатов, полученных при газификации сухой щепы, следующий. В жижке из конденсатора-холодильника содержалось в (%): растворимой смолы 13,5; летучих кислот (в пересчете на уксусную) 4,16; метилового спирта 1,23; эфиров 0,93. Удельный вес при 20° 1,046. В нерасслаивающемся конденсате из смолоотделителя влажность составляла 22,2%, летучих кислот (в пересчете на уксусную) содержалось 5,47%. Удельный вес при 20° 1,110. Нерасслаивающийся конденсат (смола) из смолоотделителя был промыт горячей водой, в результате влажность промытой смолы стала 10%, содержание летучих кислот (в пересчете на уксусную) 3,1%. В горячей воде растворилось 14% смолы (считая от безводной).

Конденсаты опыта 2 (на сырой щепе) разогревались до 80°, смешивались и отстаивались 48 *ч*. После разделения было получено (в %): жижки 91, отстойной смолы 5,5, всплывной смолы 3,5.

Анализ жижки (в %): растворимой смолы 3,05, летучих кислот (в пересчете на уксусную) 2,22, метилового спирта 1,02, эфиров (в пересчете на метилацетат) 0,3. Удельный вес при 20° 1,014. Анализ отстойной смолы: влажность 13%, летучих кислот (в пересчете на уксусную) 3,8%. Удельный вес при 20° 1,09. Анализ всплывной смолы: влажность 34,8%, летучих кислот (в пересчете на уксусную) 2,47%. Удельный вес при 20° 1,008. В опыте на сырой щепе полученные смолы водой не промывались.

Из табл. 74 видно, что при работе установки по 2-й схеме конденсаты в конденсаторе-холодильнике получались практически обессмоленными, так как содержание растворимой смолы в них было ничтожное (0,65—0,95%).

По результатам анализа генераторного газа, приведенным в табл. 75, можно считать, что теплота сгорания газа, получаемого из сырой щепы, была заметно ниже, чем из сухой (почти на 20%). В газе из сухой щепы значительно больше содержалось CO (около 30%) и меньше CO_2 (около 4%), тогда как в газе из сырой щепы этих продуктов содержалось соответственно около 23 и 8%, чем в основном и объясняется понижение теплоты сгорания

Таблица 74

Анализ конденсатов, полученных при газификации обесхвоенных лесосечных отходов по 2-й схеме

Показатели	Опыты	
	3	4
Относительная влажность лесосечных отходов, %	11,6	48,0
Конденсат, выделенный из газа смолоотделителем		
Жижка		
Растворимая смола, %	—	6,25
Летучие кислоты (в пересчете на уксусную), %	—	3,63
Метиловый спирт, %	—	0,96
Эфиры (в пересчете на метилацетат), %	—	0,36
Удельный вес при 20°	—	1,023
Отстойная смола		
Влажность, %	42,0	14,9
Летучие кислоты (в пересчете на уксусную), %	5,4	2,95
Удельный вес при 20°	1,105	1,059
Всплывная смола		
Влажность, %	—	12,6
Летучие кислоты (в пересчете на уксусную), %	—	3,4
Удельный вес при 20°	—	1,011
Конденсат, выделенный из газа в конденсаторе-холодильнике		
Растворимая смола, %	0,95	0,65
Летучие кислоты (в пересчете на уксусную), %	4,40	3,36
Метиловый спирт, %	1,19	1,33
Эфиры (в пересчете на метилацетат), %	0,83	0,30
Удельный вес при 20°	1,009	1,006

Примечание. Конденсат, выделенный из газа в смолоотделителе в опыте 3, нерасслаивающийся.

газа. При газификации сухой щепы выход газа составлял в среднем 1,75, а из сырой 2,30 *нм*^{3}/*кг*. Средний выход отстойной смолы падал с 9,3 до 6%, а водорастворимой с 9,3 до 5%. Выход летучих кислот изменялся незначительно.

Важным показателем процесса газификации является выход промытой смолы. Из табл. 76 видно, что при газификации сухой щепы выход промытой смолы составлял в среднем 45, а при газификации сырой щепы 33 *кг*/*пл. м*^{3}.

Данные теплового баланса (табл. 77) указывают на то, что значительное колебание влажности газифицируемой щепы мало влияет на изменение теплового к. п. д. газогенератора по газу

Таблица 75

Анализ газа, полученного при газификации обесхвоенных лесосечных отходов

Показатели	Опыты			
	1	2	3	4
Относительная влажность лесосечных отходов, %	11,2	51,0	11,6	48,0
Состав газа, объемные %:				
CO_2	3,8	8,4	4,2	7,3
CO	30,4	23,0	29,2	22,6
CH_4	1,2	1,6	1,4	1,5
H_2	9,6	8,6	9,0	8,2
O_2	0,6	0,6	0,6	0,6
N_2	54,4	57,8	55,6	59,8
Влагосодержание газа, поступающего в топку, *г/нм*³	45	31	36	36

Таблица 76

Выход продуктов, полученных при газификации обесхвоенных лесосечных отходов

Показатели	Опыты			
	1	3	2	4
Влажность газифицируемой щепы, %	11,2	11,6	51	48
Выход газа в пересчете на абс. сух. древесину, *нм*³/*кг*	1,72	1,77	2,24	2,37
Расход воздуха в пересчете на абс. сух. древесину, *нм*³/*кг*	1,18	1,245	1,64	1,79
Выход в пересчете на абс. сух. древесину, %:				
отстойной смолы	9,0	9,7	6,07	6,06
растворимой смолы	10,5	8,05	4,85	5,15
летучих кислот (в пересчете на уксусную)	2,46	2,60	2,64	2,96
метилового спирта	0,64	0,71	1,17	1,09
эфиров (в пересчете на метилацетат)	0,47	0,42	0,34	0,33
Выход промытой отстойной смолы, *кг/пл. м*³ (в 1 *пл. м*³ древесных отходов содержится 450 *кг* абс. сух. древесины)	43,5	46,0	34,0	32,0

(50,8 и 52,3%), а также по жидким органическим продуктам (25,8 и 31%).

Эти закономерности заметно слабее выражены по сравнению с теми, которые наблюдались при газификации сухой и сырой щепы, полученной из стволовой древесины [13].

Таблица 77

Тепловой баланс газификации обесхвоенных лесосечных отходов (в %)

Статьи баланса	Опыты			
	1	3	2	4
Относительная влажность лесосечных отходов	11,2	11,6	51,0	48,0
Теплота сгорания газа (высшая)	50,7	50,8	51,5	53,1
Теплота сгорания (высшая) органических продуктов, содержащихся в конденсатах	30,5	31,5	25,7	25,9
Потери при газификации и невязка	18,8	17,7	22,8	21,0

Данные, приведенные в табл. 78, указывают на то, что промытые смолы из обесхвоенных лесосечных отходов по ряду важных показателей удовлетворяют требованиям ТУ на мягчитель, используемый в регенератной промышленности.

Таблица 78

Анализ смолы, полученной при газификации обесхвоенных лесосечных отходов, как мягчителя для регенератной промышленности (см. табл. 26)

Образец смолы	Влажность, %	Удельный вес при 20°	Механические примеси, %	Водорастворимые кислоты, %	Вещества, не растворимые в бензине, %	Смоляные кислоты, %
Осадочная (опыты 2 и 4)	18,7	1,08	1,28	2,6	31,2	19,8
Всплывная (опыты 2 и 4)	9,9	1,07	1,37	2,3	31,2	20,3
Суммарная (опыты 1 и 3)	10,8	1,105	1,54	1,85	28,4	24,4

12. ВЫХОД ПРОДУКТОВ ПРИ ГАЗИФИКАЦИИ ЩЕПЫ ПО СХЕМЕ РЕГЕНЕРАТИВНОГО ПРОЦЕССА

При обычном воздушном дутье образовавшиеся в зоне собственно газификации CO_2 и CO будут разбавлены азотом.

Согласно постулату Ле-Шателье при понижении парциального давления продуктов взаимодействие реагирующих веществ, сопровождаемое увеличением объема газа, например по реакции $C+CO_2 \rightleftarrows 2CO$, будет протекать в сторону большего образования окиси углерода.

Степень влияния азота на изменение константы равновесия $K_p = \frac{[CO]^2}{[CO_2]}$ можно определить на основе решения ряда уравнений [35].

Так, для температуры 925° С ($T = 1198°$ К) K_p найдем из уравнения

$$\lg K_p = \lg \frac{[CO]^2}{[CO_2]} = -\frac{8947,7}{T} + 2,4673 \lg T - 1,0824 \cdot 10^{-3} T + $$
$$+ 1,16 \cdot 10^{-7} T^2 + 2,772.$$

После соответствующих преобразований $K_p = 58,6$.

Теоретическую константу K_p' для этой же температуры, но при воздушном дутье можно определить при помощи уравнения $\left(1 + \frac{4}{K_p}\right) \alpha^2 + 3,76\alpha - 4,76 = 0$. Сначала вычисляют значение α (доля CO_2, прореагировавшая с углеродом кокса по реакции $C + CO_2 \rightleftarrows 2CO$) и затем константу равновесия $K_p' = \frac{[2\alpha]^2}{[1-\alpha]}$.

Для данного примера $\alpha = 0,988$, а $K_p' = \frac{[2 \cdot 0,988]^2}{[1 - 0,988]} = 325$, т. е. в 5,5 раз больше, чем K_p.

Следовательно, течение реакции в требуемом направлении происходит не только с повышением температуры, но и при понижении парциального давления окислов углерода.

При газификации щепы по схеме регенеративного процесса при дутье с содержанием азота в большем количестве, чем в воздухе (81—85 вместо 79%), сдвиг равновесия углеродсодержащих соединений в направлении образования CO будет еще больше, чем при обычном воздушном дутье.

Как видно из рис. 15, продукты горения, используемые для дутья, охлаждались водой в оросительном скруббере, а затем вентилятором *11* через каплеулавливатель *3* подавались в газогенератор *1*.

Сырьем для опытов служила еловая щепа, полученная из дров, содержащих 10,6% коры. Средневзвешенный размер щепы 15 *мм*. Насыпной вес щепы влажностью 20% 215 *кг/нас. м*^{3}.

Сушка щепы производилась в естественных условиях под навесом.

Регенеративный процесс был осуществлен на дутье, содержащем 12,5% свободного кислорода (табл. 79).

Выход суммарного конденсата при работе газогенератора по схеме регенеративного процесса по сравнению с выходом конденсата при работе по обычной схеме увеличился на 8% (табл. 80).

Из табл. 81 видно, что при работе газогенератора на обедненном свободном кислородном дутье достигается требуемое пони-

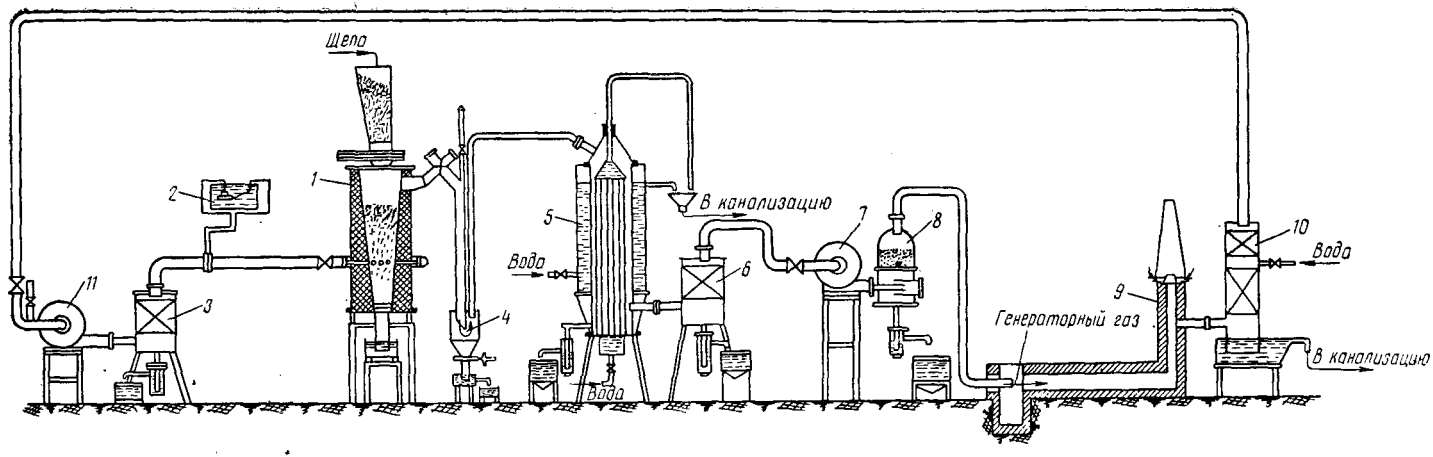


Рис. 15. Опытная установка ЛТА по схеме регенеративного процесса:

1 — газогенератор; *2* — измеритель расхода дутья; *3*, *6* и *8* — каплеулавливатели; *4* — пылеотделитель; *5* — конденсатор-холодильник; *7* — центробежный смолоотделитель; *9* — топка для сжигания газа; *10* — пылеулавливатель-скруббер с гидрозатвором; *11* — газодувка

Таблица 79

Исходные данные газификации еловой щепы по схемам воздушного и регенеративного процессов

Показатели	Схема газификации щепы	
	воздушный процесс опыт 1	регенеративный процесс опыт 2
Расход дутья, $м^3/ч$	30	37,7
Состав дутья, объемные %:		
O_2	21	12,5
CO_2	—	6,1
N_2	79	81,4
Температура дутья, °С	10	21
Интенсивность газификации по абс. сух. щепе, $кг/м^2 \cdot ч$	230	185

Таблица 80

Выход конденсата при газификации щепы по схемам воздушного и регенеративного процессов

Показатели	Схема газификации щепы	
	воздушный процесс опыт 1	регенеративный процесс опыт 2
Выход суммарного конденсата в пересчете на единицу сырья (еловой щепы), $кг/пл.\ м^3$	350	378
В том числе:		
конденсата, %:		
из конденсатора-холодильника	62	62
из смолоотделителя	38	38
Содержание в суммарном конденсате после отстоя, %:		
жижки	87	85
отстойной смолы	13	15

жение температуры в шахте без применения пара. Анализы конденсатов, полученных в том и другом опытах, мало отличались между собой.

Так, полученные из конденсатора-холодильника жижки содержали летучих кислот (в пересчете на уксусную) 3,9—4,3%, растворимой смолы 5,14—6,78%, а отстойные смолы содержали летучих кислот (в пересчете на уксусную) 3,07—3,85%, воды

Таблица 81

Распределение температур по высоте шахты при работе газогенератора по разным схемам

Точки измерения температуры в газогенераторе	Температура, °С при газификации щепы по схеме	
	воздушного процесса опыт 1	регенеративного процесса опыт 2
1-я точка на уровне 100 *мм* над фурмами	1260	950
2-я точка на уровне 150 *мм* над фурмами	1070	810
3-я точка на уровне 250 *мм* над фурмами	820	630
В горловине газогенератора	94	81

13—13,6%. Конденсаты из смолоотделителя содержали (в %): 9,4—9,7% летучих кислот, 25,2—33,4% воды.

После отстоя конденсатов в суммарных жижках содержалось (в %): летучих кислот (в пересчете на уксусную) 6—6,1; растворимых смол 23—23,1; метилового спирта 0,76—0,81; эфиров (в пересчете на метилацетат) 0,61; других органических веществ 0,48—0,53. Удельный вес при 20° 1,086—1,088. При анализе суммарных смол получено (в %): летучих кислот (в пересчете на уксусную) 4—6,5; воды 12,8—16,2. Удельный вес при 20° 1,151—1,155.

При промывке горячей водой осадочной смолы было установлено, что в ней находилось водорастворимой смолы (в пересчете на безводную) в 1-м опыте 17%, а во 2-м опыте 25%.

Таблица 82

Выход жидких продуктов при газификации еловой щепы по различным схемам (в % от веса абс. сух. щепы)

Продукты	Схема газификации щепы	
	воздушный процесс опыт 1	регенеративный процесс опыт 2
Летучие кислоты (в пересчете на уксусную)	4,6	4,9
Суммарная смола	24	26,7
В том числе:		
растворимая	17,1	18,9
нерастворимая	6,9	7,8
Метиловый спирт	0,59	0,68
Эфиры (в пересчете на метилацетат)	0,48	0,51
Реакционная вода	24,4	25,8

Из табл. 82 видно, что выход смолы и других органических продуктов при работе газогенератора по схеме регенеративного процесса на 10% выше, чем при работе по схеме воздушного процесса. Повышение выходов жидких продуктов объясняется тем, что пиролиз древесины в опыте 2 (регенеративная схема) происходит при большом газовом модуле, а это создает условия для более полного выноса смолы и других продуктов из слоя щепы. Кроме того, повышение удельного количества газа в зоне пиролиза щепы (опыт 2) приводит к увеличению скорости нагрева щепы, т. е. скорости пиролиза древесины, что способствует увеличению выходов жидких продуктов.

При работе газогенератора по схеме регенеративного процесса, расход дутья увеличился в 1,5 раза, а выход газа на 35% по сравнению с контрольным опытом.

Теплота сгорания газа из горловины газогенератора в опыте 2 заметно ниже, чем газа, полученного при газификации щепы по схеме воздушного процесса (940 *ккал/нм*^{3} вместо 1200 *ккал/нм*^{3}). Несмотря на это, газ в топке горел устойчиво.

Таблица 83

Расход дутья, выход и состав газа при газификации еловой щепы по различным схемам

Показатели	Газификация щепы по схеме	
	воздушного процесса опыт 1	регенеративного процесса опыт 2
Расход дутья в пересчете на абс. сух. щепу, *нм*^{3}/*кг*	1,01	1,52
Выход газа в пересчете на абс. сух. щепу, *нм*^{3}/*кг*	1,44	1,94
Выход газа в раскаленной зоне в пересчете на абс. сух. щепу, *нм*^{3}/*кг*	1,28	1,73
Состав газа в горловине газогенератора, объемные %:		
CO_2	6,5	7,4
CO	28,1	21,6
CH_4	1,55	1,06
H_2	8,3	6,0
O_2	0,2	0,2
N_2	55,35	63,74
Состав газа в раскаленной зоне, объемные %:		
CO_2	0,6	5,6
CO	31,4	19,1
CH_4	0,6	0,6
O_2	0,3	0,2
H_2	4,8	3,2
N_2	62,3	71,3

Газы раскаленной зоны в точке, расположенной на высоте 230 *мм* над фурмами периферийного дутья, заметно различались между собой (табл. 83).

Элементарный состав использованной щепы (в %): С — 50,6, Н — 6,17, О — 42,43, А — 0,8; полученных органических веществ суммарной жижки: С — 61÷63, Н — 6÷6,3, О — 31÷32,7 и суммарной отстойной смолы: С — 71,2÷71,7, Н — 6,7, О — 21,6÷22,1.

В табл. 84 показано, что в опыте 2 (регенеративный процесс) в газогенератор вводилось углерода примерно на 10% больше, суммарного кислорода на 35%, азота на 55%, а весь расход дутья увеличился на 28%. В газе опыта 2 углерода содержалось примерно на 13% больше, чем в опыте 1, кислорода на 20% и азота на 55%. В целом выход газа при регенеративном процессе увеличился примерно на 40%.

В суммарной жижке и отстойной смоле содержание углерода увеличилось примерно на 12%, а водорода и кислорода на 6%. Эти данные указывают на то, что процесс пиролиза щепы при регенеративной схеме газификации способствует образованию жидких продуктов, что для энергохимических установок является желательным.

Тепловой к. п. д. газогенератора в обоих процессах был практически постоянным (37,4—37,6%). Тепловой к. п. д. по жидким продуктам при работе газогенератора по схеме регенеративного процесса составил 43,9, а при работе по 1-й схеме 39,1%.

Увеличение общего к. п. д. газогенератора сопровождалось уменьшением потерь тепла с 23,5 до 18,5% в связи с понижением температуры в шахте газогенератора (в опыте 2).

Исследования показали, что отстойные смолы, промытые горячей водой, по результатам их разгонки при атмосферном давлении мало различаются между собой (табл. 85).

Выход основных продуктов от веса абс. сух. щепы при ее газификации по схеме регенеративного процесса выше, чем в опыте 1. Так, фенолов получилось больше на 17%, а нейтральных веществ на 12%.

13. ВЫХОД ПРОДУКТОВ ПРИ ГАЗИФИКАЦИИ ЩЕПЫ С ДВОЙНЫМ ОТБОРОМ ГАЗА

Работа газогенератора с двойным отбором газа производилась по схеме прямого процесса с дополнительным отбором генераторного газа из раскаленной зоны. Обычная схема газогенераторной установки была соответственно изменена (рис. 16).

Дутье в газогенератор *1* производилось под колосниковую решетку от воздуходувки *3*. Верхний отбор газа осуществлялся как и обычно через горловину, фусоотделитель *4* и холодильник *8*.

Второй отбор газа осуществлялся через отверстия в стенке шахты газогенератора. Затем газ охлаждался в холодильнике *5*

Таблица 84

Материальные балансы опытов на 100 *кг* щепы влажностью 20% (*кг*)

Статьи баланса	Углерод		Водород		Кислород		Азот		Зола		Всего	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Приход												
Щепа абс. сух.	40,50	40,50	4,94	4,94	33,92	33,92	—	—	0,64	0,64	80,0	80,00
Вода щепы	—	—	2,22	2,22	17,78	17,78	—	—	—	—	20,0	20,00
Дутье	—	3,97	—	—	24,20	32,30	79,5	124	—	—	103,7	160,27
Итого	40,50	44,47	7,16	7,16	75,90	84,00	79,5	124	0,64	0,64	203,7	260,27
Расход												
Газ	22,20	25,00	1,17	1,12	34,10	40,70	79,5	124	—	—	136,97	190,82
Жижка	10,40	11,10	5,23	5,40	38,87	40,20	—	—	—	—	54,50	56,70
Отстойная смола	5,03	6,26	0,58	0,77	2,44	3,47	—	—	—	—	8,05	10,50
Пары воды чистого газа, поступающего в топку	—	—	0,10	0,37	0,76	2,93	—	—	—	—	0,86	3,30
Зола	—	—	—	—	—	—	—	—	0,79	0,82	0,79	0,82
Невязка	+2,87	+2,11	+0,08	—0,50	—0,42	—3,30	—	—	—0,15	—0,18	+2,53	—1,87
Всего	40,50	44,47	7,16	7,16	75,9	84,00	79,5	124	0,64	0,64	203,70	260,27

Примечание. 1 — газификация щепы по схеме воздушного процесса; 2 — газификация щепы по схеме регенеративного процесса.

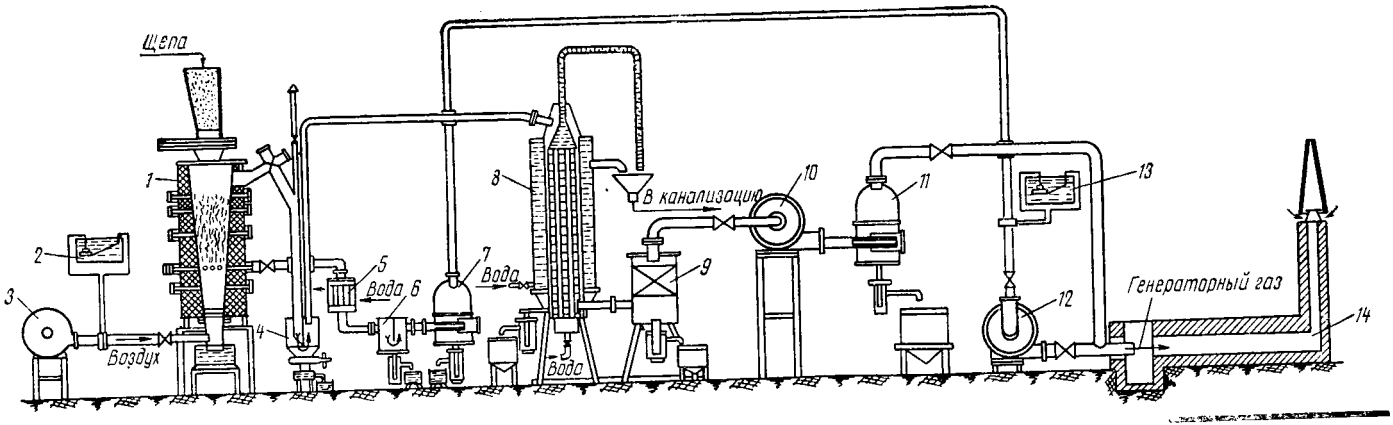


Рис. 16. Схема опытной газогенераторной установки ЛТА с двойным отбором газа:

1 — газогенератор; *2* — измеритель расхода воздуха; *3* — воздуходувка; *4* — фусоотделитель; *5* — холодильник; *6*, *7*, *9* и *11* — каплеулавливатели; *8* — конденсатор-холодильник; *10* — смолоотделитель; *12* — газодувка; *13* — измеритель расхода газа; *14* — топка для сжигания газа

Таблица 85

Разгонка отстойных промытых смол, полученных при газификации щепы по различным схемам

Показатели	Газификация щепы по схеме	
	воздушного процесса опыт 1	регенеративного процесса опыт 2
Влажность смолы, подвергаемой разгонке, %	6,5	9,8
Содержание в смоле летучих кислот (в пересчете на уксусную), %	2,7	3,7
Время разгонки, *мин*	30	40
Пределы отгонки масел, °С	110—284	110—280
Выход от веса безводной смолы, %:		
масел	54,7	54,4
пека	37,9	40,6
Содержание в маслах, %:		
фенолов	46,8	49,8
нейтральных веществ	24,8	24,9
карбоновых кислот	13,8	12,1

и после прохождения через два каплеулавливателя *6* и *7* нагнетался газодувкой *12* в топку *14* для сжигания.

Газ второго отбора содержал ничтожное количество паров воды и был обессмоленным. Работа установки с одним (верхним) отбором газа производилась по обычной схеме, дутье подавалось в газогенератор под колосниковую решетку, а отбор газа осуществлялся только через верхнюю горловину.

Дополнительный отбор (второй) газа осуществлялся через боковые отверстия, расположенные на высоте 500 *мм* над колосниковой решеткой газогенератора.

Исследования проводились на еловой щепе с относительной влажностью 25% и средневзвешенным размером 28 *мм*. Интенсивность газификации по абс. сух. щепе колебалась для обоих опытов в пределах 200—230 *кг/м²·ч*. Температура дутья была постоянной (20°), а расход его изменялся в пределах 30,5—30,7 *м³/ч*.

Из табл. 86 видно, что суммарный выход конденсата для обоих опытов был почти одинаковый (350—354 *кг/пл. м³*). В точке отбора нижнего газа температура в шахте была 1010°. Температуры по высоте газогенератора и в системе газопроводов были примерно одинаковы.

В газе нижнего отбора перед холодильником содержалось (в *мг/нм³*): пыли 1,8, смолы 0,13, воды 1600.

Эти данные указывают, что газ раскаленной зоны газогенератора (на высоте 500 *мм* над колосниковой решеткой) был

Таблица 86

Газификация еловой щепы с одним и двумя отборами газа

Показатели	Газификация щепы	
	с одним отбором газа	с двумя отборами газа
Выход суммарного конденсата в пересчете на единицу сырья (количество древесины на 1 *пл. м*³ щепы принимается 450 *кг*), *кг/пл. м*³	350	354
Конденсат, %:		
из конденсатора-холодильника	55	64
из смолоотделителя	45	36
Суммарный конденсат, %:		
жижка (водный раствор)	87,5	88,5
отстойная смола	12,5	11,5
Температура в шахте газогенератора, °С, на высоте над колосниковой решеткой:		
500 *мм*	955	1010
250 *мм*	1060	1052
150 *мм*	1160	1200
Температура газа в аппаратах, °С:		
в горловине газогенератора	80	81
перед конденсатором-холодильником	57	62
после конденсатора-холодильника	24	25
после смолоотделителя	23	24

почти обессмоленным и сухим. Окончательная очистка этого газа до требований, предъявляемых к силовым газам, используемым в двигателях внутреннего сгорания, может быть легко осуществлена.

Конденсаты, полученные при газификации еловой щепы по схеме обычного процесса и по схеме двойного отбора, мало отличались между собой.

В жижках из конденсатора-холодильника содержалось: летучих кислот (в пересчете на уксусную) 3,75—3,8%, растворимой смолы 5,1—5,32%. Удельный вес при 20° 1,030—1,035. В отстойных смолах из конденсатора-холодильника обнаружено: летучих кислот (в пересчете на уксусную) 3,1—3,4%, воды 16,1—17,4%. Удельный вес смол при 20° 1,128—1,130. В нерасслаивающихся конденсатах, полученных в смолоотделителе для обоих опытов, содержалось: летучих кислот (в пересчете на уксусную) 6,8—6,9%, воды 49,4—51,7%. Удельный вес конденсатов при 20° 1,140—1,147.

Состав суммарных конденсатов после смешивания их и отстоя был примерно одинаков. Так, в жижке найдено (в %): летучих кислот (в пересчете на уксусную) 6—6,3, растворимой смолы

16,4—19,8, метилового спирта 0,52, эфиров (в пересчете на метилацетат) 1,05—1,14. Удельный вес жижки при 20° 1,078—1,084. В отстойных смолах содержалось: летучих кислот (в пересчете на уксусную) 4,1—5,4%, воды 11—18,5%. Удельный вес смолы при 20° 1,132—1,133. Промытые горячей водой отстойные смолы в обоих опытах имели следующие свойства: количество летучих кислот (в пересчете на уксусную) 1,7—2,8%, воды 7,4—7,8%, удельный вес при 20° 1,09—1,12. При промывке отстойных смол горячей водой было установлено, что в смоле, полученной при газификации щепы по схеме двойного отбора газа, растворимой смолы содержалось 13,5% (в пересчете на безводную), а в смоле, полученной при газификации щепы по обычной схеме, 16%.

Таблица 87

Выход жидких продуктов при газификации еловой щепы с одним и двумя отборами газа (в % от веса абс. сух. щепы)

Продукты, получаемые при газификации	Газификация щепы	
	с одним отбором газа	с двумя отборами газа
Летучие кислоты (в пересчете на уксусную)	4,63	4,77
Суммарная смола	21,0	19,0
В том числе:		
растворимая	14,7	12,4
отстойная	6,3	6,6
Метиловый спирт	0,41	0,47
Эфиры (в пересчете на метилацетат)	0,82	0,90
Реакционная вода	20,0	22,0

Из табл. 87 видно, что при работе газогенератора с двойным отбором газа, общий выход смолы, считая от веса абс. сух. щепы, равен 19%, а при обычном процессе 21%. Выход смолы снижается за счет растворимой смолы (12,4 вместо 14,7%). Выход отстойной смолы и летучих продуктов (кислот, метилового спирта, эфиров, и др.) при двойном отборе газа почти не изменился. Уменьшился выход растворимой смолы, как менее термостойкой.

При газификации щепы с двойным отбором газа общий выход газа увеличился на 8%. Из раскаленной зоны (второй отбор) было получено 29% газа (табл. 88).

Тепловой к. п. д. генератора по газу при одном (верхнем) отборе газа был равен 44,1%. При газификации щепы с двойным отбором газа тепловой к. п. д. по верхнему газу составил 35,4%, а по газу второго отбора 11,1%. Тепловой к. п. д. по жидким продуктам для первого опыта (с одним отбором газа) равен

Таблица 88

Расход дутья, выход и состав газа при газификации щепы с одним и двойным отборами газа

Показатели	Газификация щепы	
	с одним отбором газа	с двумя отборами газа
Расход дутья в пересчете на абс. сух. щепу, *нм³/кг*	1,18	1,28
Выход газа в пересчете на абс. сух. щепу, *нм³/кг*	1,62	1,735 (100%)
В том числе:		
в точке нижнего отбора	—	0,495 (29%)
в точке верхнего отбора	1,62	1,240 (71%)
Состав газа в горловине газогенератора (верхний отбор), объемные %:		
CO_2	2,35	3,19
CO	31,60	31,20
CH_4	1,69	1,79
H_2	6,68	7,90
O_2	0,20	0,20
N_2	57,48	55,72
Состав газа второго отбора (нижнего), объемные %:		
CO_2	—	1,28
CO	—	32,10
CH_4	—	0,55
H_2	—	3,33
O_2	—	0,20
N_2	—	69,54

33,8%, для второго опыта (с двойным отбором газа) 31,5%.

При разгонке (под атмосферным давлением) отстойных смол, промытых горячей водой, установлено, что масла по содержанию фенолов и других веществ в обоих опытах мало различаются между собой (табл. 89).

14. ВЫХОД ПРОДУКТОВ ПРИ ГАЗИФИКАЦИИ ЩЕПЫ С КИСЛЫМИ КАТАЛИЗАТОРАМИ

За последние годы вопросам получения фурфурола уделяется большое внимание. Наличие альдегидной группы и высокая реакционная способность фурфурола создают благоприятные перспективы для применения его в химической промышленности.

Получение фурфурола основано на использовании различных пентозансодержащих материалов растительного происхождения

Таблица 89

Разгонка отстойной, промытой смолы, полученной при газификации щепы по разным схемам

Показатели	Газификация щепы	
	с одним отбором газа	с двумя отборами газа
Влажность смолы, %	7,4	7,8
Время разгонки смолы, *мин*	60	62
Конечная температура разгонки смолы, °С	246	230
Выход в пересчете на безводную смолу, %:		
масел	46,4	38,7
пека	46,8	55,8
Итого	93,2	94,5
Содержание в пересчете на безводные масла, %:		
фенолов	56,7	62,2
нейтральных веществ	27,5	26,0
карбоновых кислот	5,4	8,6

путем отщепления трех молекул воды от молекулы пентозы, образующейся при реакции гидролиза пентозанов:

$$\underset{\text{пентозаны}}{(C_5H_8O_4)_n} + n\,H_2O = \underset{\text{пентозы}}{n\,(C_5H_{10}O_5)}$$

$$\underset{\text{пентоза}}{C_5H_{10}O_5} - 3H_2O = \underset{\text{фурфурол}}{C_5H_4O_2}$$

Распространены и изучаются следующие методы получения фурфурола: путем прямого гидролиза пентозансодержащего сырья с применением в качестве катализатора минеральных кислот [36] и путем сухой перегонки растительных материалов, предварительно смоченных слабым раствором минеральных кислот [37].

В данном случае определяли возможность получения фурфурола путем совмещения гидролиза и пиролиза древесины при ее газификации. Опыты проводились на березовой и осиновой щепе с применением в качестве катализатора серной кислоты и других катализаторов. Исходным сырьем служили рядовые березовые и осиновые дрова (табл. 90).

Насыпной вес березовой щепы был равен 240 *кг/м*³ (при $W = 26\%$), осиновой 200 *кг/м*³ (при $W = 25\%$). Средневзвешенный размер березовой щепы 22 *мм*, осиновой 32 *мм*.

Таблица 90

Состав дров (щепы), использованных для получения фурфурола методом газификации, в %

Состав щепы	Березовые дрова	Осиновые дрова
Кора	12	13
Гниль	3	11
Здоровая древесина	85	76

Как видно из таблицы, гнилой древесины в исходном сырье содержалось немного[1], а количество коры было повышенное. Из данных о химическом составе древесины, приведенных в табл. 91, следует, что в березовой щепе пентозанов было 20,6%, а в осиновой 19,4%.

Таблица 91

Химический состав щепы, использованной для получения фурфурола методом газификации (% от абс. сух. навески)

Состав щепы	Березовая щепа	Осиновая щепа
Целлюлоза по азотно-спиртовому методу	43,6	44,2
Лигнин по сернокислотному методу	22,0	20,5
Пентозаны	20,6	19,4
Полиуроновые кислоты	5,8	5,5
Вещества, растворимые в горячей воде	5,8	2,5
Вещества, растворимые в серном эфире	2,5	1,1
Вещества, растворимые в спирто-бензольной смеси (1 : 1)	6,6	3,2
Метоксильные группы ($-OCH_3$)	5,0	5,4
Зола	0,4	0,8
Легкогидролизуемые вещества (РВ)	21,6	10,5

По некоторым данным, в березовой и осиновой древесине количество пентозанов достигает 25—26% [38]. Кроме пентозанов, в образовании фурфурола участвуют также полиуроновые кислоты.

Пропитка щепы раствором серной кислоты. Пропитка щепы производилась в резервуарах, в которые заливали 120—125 *л* раствора серной кислоты.

В этот раствор погружали взвешенный дырчатый барабан, наполненный щепой. После заданной по времени выдержки барабан извлекали. Раствор кислоты стекал в течение 15 *мин*. Затем барабан со щепой взвешивали, определяя привес.

[1] По данным кафедры древесиноведения ЛТА им. С. М. Кирова, осиновые дрова были поражены ложным трутовиком.

Динамика пропитки сухой березовой щепы разбавленным раствором серной кислоты приведена на рис. 17, из которого видно, что при температуре 18° и модуле 1 : 6 оптимальное время пропитки можно принять 2 *ч*; за это время происходит практически предельное насыщение древесины раствором и относительная влажность щепы повышается с 14,3 до 55—56%. Та же щепа за 45 *мин* удерживала до 668 *г* раствора, считая на 1 *кг* абс. сух. древесины.

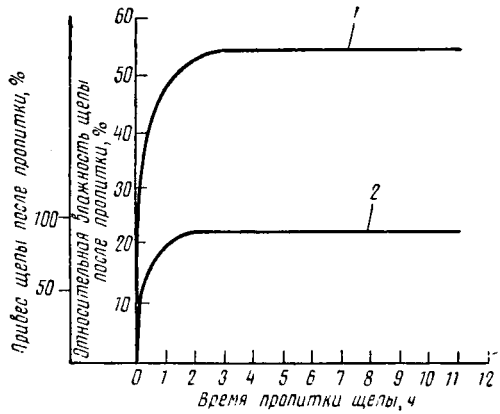


Рис. 17. Пропитка березовой щепы раствором, содержащим 0,7% серной кислоты:
1 — относительная влажность щепы после пропитки; *2* — привес щепы после пропитки

При пропитке влажной щепы (39%) насыщение раствором серной кислоты наступало за более короткий промежуток времени (45 *мин*). При этом относительная влажность щепы достигала 53—54%, но раствора удерживалось несколько меньше (510 *г* на 1 *кг* абс. сух. древесины).

При погружении более сырой щепы в разбавленный раствор серной кислоты скорость проникновения воды в древесину вначале пропитки понижается, но серная кислота после окончания пропитки щепы водой продолжает диффундировать в щепу.

Из табл. 92 видно, что при пропитке сырой березовой щепы предельная влажность древесины наступает за короткий промежуток времени. Однако после этого поступление серной кислоты в щепу продолжается, на что указывает постепенное уменьшение кислотности пропиточного раствора, происходящее, по-видимому, за счет диффузии кислоты внутрь кусков древесины, протекающей очень медленно.

Для того чтобы щепа полностью пропиталась водой, потребовалось 45 *мин*, а диффузия кислоты в щепу закончилась более чем за 12 *ч*.

Таблица 92

Пропитка березовой щепы раствором серной кислоты при температуре 18° и модуле пропитке 1 : 6

Время пропитки щепы		Концентрация серной кислоты в пропиточном растворе, %	Относительная влажность щепы, %
ч	*мин*		
0	0	1,225	39
0	5	1,127	52
0	45	1,120	54
3	0	1,117	54
12	0	0,980	54
15	0	0,978	54

Уменьшение кислотности пропиточного раствора к концу пропитки наблюдается при различных концентрациях серной кислоты (табл. 93). Пропитка щепы проводилась в течение 4 *ч* при температуре 21°, модуле 1 : 5 и относительной влажности исходной щепы 14,3%.

Таблица 93

Изменение концентрации серной кислоты в пропиточном растворе

Опыты	Концентрация серной кислоты в пропиточном растворе, %	
	до пропитки древесины	после пропитки древесины
1	0,88	0,686
2	1,22	0,931
3	1,52	1,298
4	1,83	1,519

Наблюдающееся снижение концентрации серной кислоты в пропиточном растворе, происходящее в основном вследствие диффузии серной кислоты внутрь древесины, может быть также и вследствие взаимодействия кислоты с различными солями и азотсодержащими соединениями древесины. Титрование пропиточного раствора серной кислоты щелочью и определение количества ионов SO_4'' при помощи бария $Ba^{\cdot\cdot}$ показало наличие в растворе солей серной кислоты, образовавшихся, видимо, при реагировании серной кислоты с различными соединениями, находящимися в древесине.

Результаты этих опытов приведены в табл. 94. В данном случае пропитке подвергалась осиновая щепа при температуре 14°, модуле 1 : 4 и исходной относительной влажности 12%.

Из изложенного видно, что для ускорения процесса пропитки необходимо применять щепу с меньшей влажностью, а при

Таблица 94

Анализ пропиточного раствора на содержание серной кислоты

Метод анализа	Концентрация серной кислоты в пропиточном растворе, %			
	до пропитки древесины	после пропитки древесины	до пропитки древесины	после пропитки древесины
	опыт 1		опыт 2	
Титрование нормальным раствором щелочи	1,2	1,13	0,72	0,64
Осаждение хлористым барием ($BaCl_2$)	1,2	1,2	0,72	0,72

Таблица 95

Газификация березовой и осиновой щепы после пропитки ее раствором серной кислоты

Показатели	Опыты на березовой щепе					Опыты на осиновой щепе				
	1 (контрольный)	2	3	4	5	1 (контрольный)	2	3	4	5
Концентрация серной кислоты в пропиточном растворе, %	—	0,40	0,76	0,90	1,20	—	0,43	0,72	0,90	1,20
Относительная влажность щепы после пропитки и сушки, %	14,3	27	29	24	30	20,1	24,5	22,6	29,1	27,7
Производительность газогенератора по абс. сух. древесине, *кг/ч*	38	30	26	32	26	39	38	29	29	26
Температура газа в горловине газогенератора, °С	80	76	74	72	72	69	67	73	68	75
Температура газа после смолоотделителя, °С	19	20	19	16	10	17	26	25	20	13
Конденсат, %:										
из кондесатора-холодильника	68	61	64	64	73	53	48	43	45	51
из смолоотделителя	32	39	36	36	27	47	52	57	55	49
Результаты разделения суммарного конденсата в отстойнике, %:										
жижка	75	78	80	79	85	77	82	83	87	86
отстойная смола	25	22	20	21	15	23	18	17	13	14

многократном использовании пропиточного раствора серной кислоты необходимо восполнять его кислотность.

Газификация березовой и осиновой щепы с кислым катализатором. Щепа после пропитки раствором серной кислоты подсушивалась в естественных условиях под навесом. Концентрация серной кислоты в пропиточных растворах составляла 0,4—0,43; 0,72—0,76; 0,9 и 1,2%. Газификация щепы на установке производилась по 1-й схеме.

Как видно из табл. 95, производительность газогенератора по абс. сух. древесине колебалась в пределах 26—39 *кг/ч*.

Температура дутья при проведении опытов колебалась от 7 до 12°. Газ охлаждался в конденсаторе-холодильнике до 13—30° и дополнительно при прохождении по газопроводам и через смолоотделитель за счет потерь тепла в окружающую среду. Температура газа после смолоотделителя составляла 10—26°. Таким образом, газ при выходе из конденсатора-холодильника охлаждался за счет теплопотерь еще на 3—4°.

Фурфурол в газогенераторных конденсатах определялся при помощи барбитуровой кислоты путем получения характерного осадка в конденсате, отгоняемом из пробы анализируемых образцов.

Получаемые при газификации березовой щепы конденсаты из конденсатора-холодильника разделялись на жижку и отстойную смолу. Конденсат из смолоотделителя во всех опытах получался нерасслаивающимся. Все три жидкости анализировались раздельно. Результаты анализов конденсатов, полученных из березовой щепы, приведены в табл. 96.

Газогенераторные конденсаты из осиновой щепы, получаемые из конденсатора-холодильника и смолоотделителя, смешивались и разделялись в отстойнике.

Результаты анализа жижки и отстойные смолы приведены в табл. 97, из которой видно, что содержание фурфурола, например, в отстойной смоле, полученной из осиновой щепы, достигало 8,3—10,5%, тогда как в жижке концентрация фурфурола составляла 3,2—3,44%.

Аналогичная картина наблюдается при рассмотрении результатов анализа конденсатов из конденсатора-холодильника, полученных при газификации березовой древесины. Так, фурфурола в отстойной смоле содержится 5,07—5,6%, а в жижке 1,8—2,5%. Очевидно, что отстойная смола является более активным растворителем фурфурола, чем жижка.

Объективным показателем лучшей растворимости фурфурола в смоле является коэффициент распределения K, который оказался для всех опытов с катализатором значительно меньше единицы и для березовых жижки и смолы колебался от 0,32 до 0,42, а для осиновых от 0,33 до 0,45. По показателям кислотности, влажности, содержанию спиртов, эфиров, растворимой смолы

Таблица 96

Анализы конденсатов, полученных при газификации березовой щепы

Показатели	Опыты				
	1	2	3	4	5
Концентрация серной кислоты в пропиточном растворе, %	0,0	0,40	0,76	0,90	1,20
Жижка из конденсатора-холодильника, %	57	58	60	59	70
Отстойная смола из конденсатора-холодильника, %	3	3	4	5	2
Конденсат из смолоотделителя, %	40	39	36	36	28
Анализ жижки из конденсатора-холодильника, %:					
растворимая смола	14,7	10,9	7,18	7,52	5,1
фурфурол	0,07	0,88	1,92	2,50	1,8
летучие кислоты (в пересчете на уксусную)	10,9	6,41	6,16	7,25	7,85
метиловый спирт	1,36	1,00	0,97	0,96	0,57
эфиры (в пересчете на метилацетат)	1,04	0,45	0,28	0,42	0,25
Удельный вес при 20°	1,065	1,047	1,035	1,041	1,036
Анализ отстойной смолы из конденсатора-холодильника, %:					
фурфурол	0,37	2,74	4,97	5,96	5,07
летучие кислоты (в пересчете на уксусную)	5,63	4,58	4,62	5,28	5,01
влажность	12,0	15,9	17,8	17,9	23,3
Удельный вес при 20°	1,115	1,122	1,124	1,132	1,131
Анализ конденсата из смолоотделителя, %:					
фурфурол	0,124	1,59	5,52	5,70	5,30
летучие кислоты (в пересчете на уксусную)	11,0	8,46	8,15	10,0	9,0
влажность	31,0	45,3	45,8	46,5	58,2
Удельный вес при 20°	1,137	1,144	1,130	1,153	1,116
Коэффициент распределения для фурфурола $K = \frac{C_ж}{C_{см}}$	—	0,32	0,39	0,42	0,36

Примечание. $C_ж$ — концентрация фурфурола в жижке, %; $C_{см}$ — концентрация фурфурола в осадочной смоле, %.

и др. фурфурольные смолы и жижки заметно отличались от контрольных.

В табл. 98 представлены выходы жидких продуктов, полученных при газификации березовой и осиновой щепы с сернокислотным катализатором. Из этих данных видно, что оптимальную концентрацию серной кислоты в пропиточном растворе следует принимать 0,7—0,9%. При этом выход фурфурола резко

Таблица 97

Анализы газогенераторных суммарных конденсатов, полученных из осиновой древесины после их отстоя и разделения

Концентрация серной кислоты в растворе при пропитке газифицируемой щепы, %	Анализ жижки						Анализ отстойной смолы				
	фурфурол, %	летучие кислоты (в пересчете на уксусную), %	растворимая смола, %	метиловый спирт, %	эфиры (в пересчете на метилацетат), %	удельный вес при 20°	фурфурол, %	летучие кислоты (в пересчете на уксусную), %	влажность, %	удельный вес при 20°	$K = \frac{C_ж}{C_{см}}$
Контрольный опыт	0,05	9,7	14,2	1,70	1,18	1,065	0,22	9,8	8,0	1,152	—
0,42	1,48	8,9	19,4	1,28	0,47	1,081	3,27	7,3	9,0	1,111	0,45
0,74	3,44	10,5	21,4	1,29	0,57	1,088	10,5	7,7	20,0	1,171	0,33
0,90	3,36	8,7	13,6	1,07	0,47	1,058	8,9	6,0	13,4	1,151	0,38
1,20	3,20	8,3	9,1	0,50	0,72	1,041	8,3	6,2	17,6	1,161	0,39

Таблица 98

Выход жидких продуктов при газификации березовой и осиновой щепы, пропитанной катализатором (в % от веса абс. сух. древесины)

Концентрация пропиточного раствора серной кислоты, %	Фурфурол		Летучие кислоты (в пересчете на уксусную)		Смола						Метиловый спирт		Эфиры (в пересчете на метилацетат)	
					всего		отстойная		растворимая					
	береза	осина	береза	осина	береза	осина	береза	осина	береза	осина	береза	осина	береза	осина
Контрольные опыты без пропитки . . .	0,07	0,07	7,3	7,9	22,0	23,4	6,4	9,4	15,6	14,0	0,92	1,30	0,70	0,90
0,40—0,43	1,10	1,50	6,5	7,9	23,9	26,1	6,2	10,5	17,7	15,6	0,91	1,20	0,41	0,43
0,70—0,76	3,48	3,22	7,0	7,0	22,2	19,7	7,3	7,2	14,9	12,5	1,00	0,90	0,29	0,40
0,90	3,08	3,30	6,6	6,7	17,3	17,3	6,1	4,7	11,2	12,6	0,77	0,88	0,34	0,39
1,20	2,33	3,00	6,7	6,1	11,0	13,4	3,9	3,5	7,1	9,9	0,47	0,40	0,21	0,55

возрастает. Выход других ценных продуктов (например, летучих кислот и смол) несколько уменьшается. При увеличении концентрации в пропиточном растворе серной кислоты до 1,2% выход фурфурола снижается и заметно падает выход смолы. Очевидно, при повышенных количествах серная кислота разрушающе действует на продукты пиролиза древесины. Для наглядности на рис. 18 приведены сравнительные кривые, показывающие влияние концентрации сернокислотного катализатора на выход фурфурола при газификации березовой и осиновой щепы.

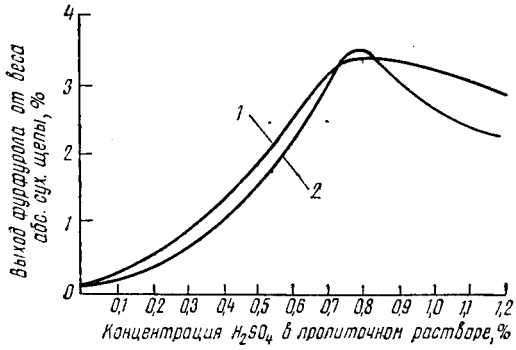


Рис. 18. Выход фурфурола в зависимости от концентрации серной кислоты в пропиточном растворе при газификации щепы:
1 — осиновой; *2* — березовой

Как видно из рисунка, характер кривых для березовой и осиновой щепы близок между собой, особенно в первой ее половине. Следовательно, для получения фурфурола можно использовать почти с одинаковым эффектом как березовую, так и осиновую щепу.

Применение других катализаторов при газификации щепы. Опыты получения фурфурола при пиролизе березовой щепы с применением других кислых катализаторов производились в вертикальной лабораторной реторте с наружным электрическим обогревом и в газогенераторе ЛТА. Сухая березовая щепа пропитывалась раствором соляной кислоты, смесью раствора серной кислоты и хлористого натрия, раствором фосфорной кислоты и суперфосфатной вытяжкой. После пропитки щепа подсушивалась до влажности 30%. Конечная температура сухой перегонки 400—450°, а продолжительность процесса около 2 *ч*. На рис. 19—22 показаны выходы продуктов при проведении опытов, из которых видно, что с повышением концентрации катализатора в пропиточном растворе увеличивается выход фурфурола, незначительно падает выход летучих кислот и резко уменьшается количество смолы. Одновременно растет выход угля. В табл. 99

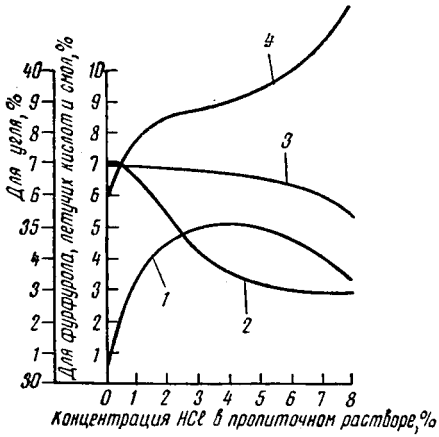


Рис. 19. Выход продуктов пиролиза березовой щепы в зависимости от концентрации соляной кислоты в пропиточном растворе (опыты в лабораторной реторте):

1 — фурфурол; *2* — смола; *3* — летучие кислоты; *4* — уголь

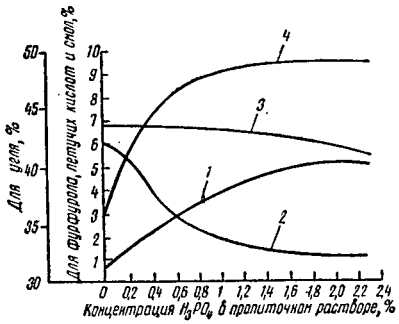


Рис. 20. Выход продуктов пиролиза березовой щепы в зависимости от концентрации фосфорной кислоты в пропиточном растворе (опыты в лабораторной реторте):

1 — фурфурол; *2* — смола; *3* — летучие кислоты; *4* — уголь

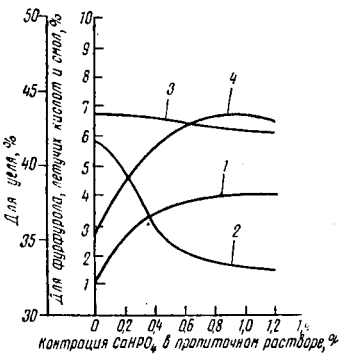


Рис. 21. Выход продуктов пиролиза березовой щепы в зависимости от концентрации $CaHPO_4$ в пропиточном растворе (опыты в лабораторной реторте):

1 — фурфурол; *2* — смола; *3* — летучие кислоты; *4* — уголь

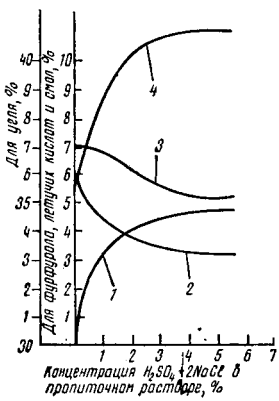


Рис. 22. Выход продуктов пиролиза березовой щепы в зависимости от концентрации $H_2SO_4+2NaCl$ в пропиточном растворе (опыты в лабораторной реторте):

1 — фурфурол; *2* — смола; *3* — летучие кислоты; *4* — уголь

приведены сравнительные результаты пиролиза березовой щепы в лабораторной реторте и газогенераторе. Из этих данных видно, что серная кислота является наиболее активным катализатором по сравнению с катализаторами на основе соляной и фосфорной кислот.

При пиролизе щепы в реторте выход фурфурола оказался значительно бо́льшим, чем в газогенераторе. В данном случае на выход фурфурола влияло время пиролиза, которое для реторты равнялась 2 *ч*, а для газогенератора 10—15 *мин*. Следовательно,

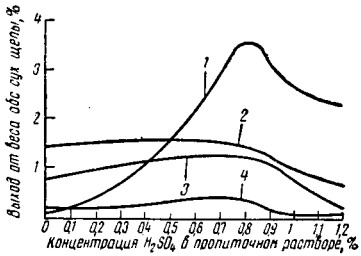


Рис. 23. Выход некоторых продуктов при газификации березовой щепы в зависимости от концентрации серной кислоты в пропиточном растворе:

1 — фурфурол; *2* — фенолы; *3* — нейтральные вещества; *4* — карбоновые кислоты

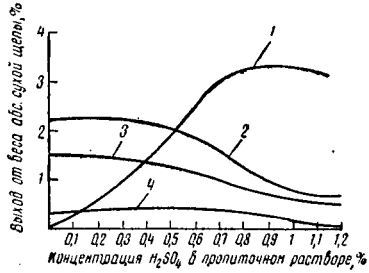


Рис. 24. Выход некоторых продуктов при газификации осиновой щепы в зависимости от концентрации серной кислоты в пропиточном растворе:

1 — фурфурол; *2* — фенолы; *3* — нейтральные вещества; *4* — карбоновые кислоты

для получения фурфурола методом газификации наиболее перспективным катализатором является серная кислота. При этом катализаторе получаются наиболее высокие выходы фурфурола, и, кроме того, не так заметно снижаются выходы других продуктов, в частности смолы. На рис. 23 и 24 приведены выходы фурфурола, фенолов и других продуктов, содержащихся в отстойных смолах, полученных из березовой и осиновой древесины, которая была пропитана раствором различных катализаторов. Для определения фенолов и других продуктов отстойная смола после промывки водой была подвергнута разгонке при атмосферном давлении до конечной температуры 280—300°. Время разгонки смолы 45—60 *мин*. При разгонке фурфурольной смолы выход пека равнялся 50—55%, а из контрольной смолы 35—40%. Повышение выходы пека объясняется образованием при нагревании дополнительного количества нелетучих продуктов из фурфурола и фенола.

Потери фурфурола при охлаждении и обессмоливании генераторного газа. Выход фурфурола при газификации щепы во

Таблица 99

Выход продуктов при пиролизе березовой щепы, пропитанной различными катализаторами

Обработка березовой щепы	Условия пиролиза щепы	Выход жидких продуктов от веса абс. сух. щепы, %		
		фурфурола	летучих кислот (в пересчете на уксусную)	смолы
Контрольный опыт	Лабораторная сухая перегонка	0,37	6,7	6,2
	Полузаводская газификация	0,26	7,8	24,1
Пропитка раствором серной кислоты, 0,9%	Лабораторная сухая перегонка	4,60	6,8	4,6
	Полузаводская газификация	3,08	6,6	17,3
Пропитка раствором серной кислоты 1,10% и хлористого натрия 1,34%	Лабораторная сухая перегонка	3,40	6,9	4,3
	Полузаводская газификация	1,30	6,5	12,0
Пропитка раствором соляной кислоты 2%	Лабораторная сухая перегонка	4,47	6,25	5,6
	Полузаводская газификация	1,38	7,4	11,0
Пропитка раствором фосфорной кислоты 1,2%	Лабораторная сухая перегонка	5,18	6,7	1,04
	Полузаводская газификация	1,76	1,53	9,2
Пропитка суперфосфатной вытяжкой 1,3% (в пересчете на фосфорную кислоту)	Лабораторная сухая перегонка	3,9	6,2	1,7
	Полузаводская газификация	2,0	6,2	10,5

многом определяется степенью улавливания его из газа. Полнота улавливания фурфурола зависит главным образом от степени охлаждения газа. Так, при температуре газа после смолоотделителя 51—56° общий коэффициент улавливания фурфурола (в холодильнике и смолоотделителе) равнялся 71—74%. При охлаждении газа до 17—24° степень извлечения фурфурола достигала 95—97%, причем первоначальная концентрация фурфурола в газе мало влияла на этот процесс. Приведенные данные указывают на то, что существующие схемы энергохимических установок вполне могут применяться для получения из древесины не только обычных лесохимикатов, но и фурфурола.

Распределение в аппаратах фурфурола и других жидких продуктов при охлаждении газа перед смолоотделителем до 23—27° указано в табл. 100, из которой видно, что смолы, находясь в охлажденном газе в виде мельчайших частиц (смоляного тумана), являются прекрасным абсорбентом для фурфурола и летучих

кислот. Вода в основном выпадает в охладителе газа (85—90%); на долю смолоотделителя остается незначительное ее количество (10—15%).

Таблица 100

Степень улавливания из газа жидких продуктов в различных аппаратах (в %)

Продукты, улавливаемые из газа	В конденсаторе-холодильнике	В смолоотделителе
Вода	85—90	10—15
Смола (растворимая и отстойная)	12—15	85—88
Летучие кислоты	30—40	60—70
Фурфурол	40—50	50—60

Значительный интерес представляло определение возможности и целесообразности получения обессмоленной фурфурольной жижки. Выделение фурфурола методом ректификации из обессмоленной жижки более заманчиво, чем из смоляной. На обессмоленной жижке испарители работают без остановки на чистку, как правило, более продолжительное время, чем на жижке, содержащей в значительном количестве растворимую смолу.

В табл. 101 указано влияние предварительного смолоотделения на содержание основных продуктов в конденсате (жижке). По 2-й схеме жижка из конденсатора-холодильника стекала практически обессмоленной (растворимой смолы в ней содержалось 1% вместо 6%). Обессмоленный конденсат оказался обедненным летучими кислотами и фурфуролом по сравнению со смоляным конденсатом, полученным по 1-й схеме. Фурфурол и летучие кислоты при работе установки по 2-й схеме в значительной степени были выделены из газа смолоотделителем вместе со смолой. На долю конденсатора-холодильника оставалось выделить из газа оставшуюся часть этих продуктов.

Таблица 101

Анализ конденсата (жижки) при работе газогенераторной установки по 1 и 2-й схемам (%)

Конденсат (жижка) из конденсатора-холодильника	Фурфурол	Летучие кислоты (в пересчете на уксусную)	Растворимая смола	Метиловый спирт	Эфиры (в пересчете на метилацетат)
Необессмоленный (1-я схема)	3,4	6,2	6	1,35	0,4
Обессмоленный (2-я схема)	2,7	3,7	1	1,40	0,4

При работе газогенераторной установки по 1-й схеме газ охлаждался до 20°. При этом в конденсаторе-холодильнике фурфурола выпадало больше, чем по 2-й схеме за счет того, что этот конденсат содержал больше смолы, сорбирующей фурфурол. Потери фурфурола с газом, направляемым в топку для сжигания, снижались до 2%. При работе установки по 2-й схеме в смолоотделителе было выделено 71% фурфурола, хотя температура газа в этом аппарате равнялась 51°. Отметим, что в смолоотделителе осаждалось основное количество смолы, являющейся хорошим сорбентом фурфурола. В конденсаторе-холодильнике улавливалось всего лишь 24% фурфурола. Конденсат в этом случае получался обессмоленный, поэтому интенсивной сорбции фурфурола не происходило и бóльшее количество фурфурола (5%) увлекалось газом (табл. 102).

Таблица 102

Распределение фурфурола при работе газогенераторной установки по 1 и 2-й схемам

Схема обработки газа, выходящего из газогенератора	Количество фурфурола, выделенного из газа, %		Потери с газом, %
	в смолоотделителе	в конденсаторе-холодильнике	
1-я схема	57 ($t = 20°$)	41 ($t = 20°$)	2
2-я схема	71 ($t = 51°$)	24 ($t = 20°$)	5

Следовательно, получить обессмоленную фурфурольную жижку возможно. Однако работа газогенераторной установки с получением обессмоленной жижки вряд ли будет целесообразной, так как степень общего улавливания фурфурола в этом случае составляет 95 вместо 98%. В обессмоленной жижке содержится только 24% фурфурола от первоначального содержания его в газе, выходящем из газогенератора. Очевидно, для более полного улавливания фурфурола из парогазов необходимо создать такие схемы обработки парогазов, в которых смола и фурфурол улавливались бы одновременно.

Многочисленные анализы выходящего из газогенератора газа показали, что теплота сгорания газа из щепы с катализатором примерно на 10% выше теплоты сгорания газа, получаемого из щепы без катализатора.

Промывка горячей водой фурфурольных газогенераторных смол. В древесных газогенераторных отстойных смолах, отделяемых от жижки, содержится некоторое количество растворимой смолы. Известно, что эту смолу можно удалить из соответствующих осадочных смол путем промывки их горячей водой.

Таблица 103

Результаты промывки смолы горячей водой (1 : 2)

Образцы исходных конденсата и осадочной смолы, полученных при работе ГГУ по 1-й схеме	Анализ смолы, %				Соотношение между безводными смолами, %	
	до промывки		после промывки			
	влажность	содержание летучих кислот (в пересчете на уксусную)	влажность	содержание летучих кислот (в пересчете на уксусную)	не растворимой в воде (отстойной)	растворимой в воде
Нерасслаивающийся конденсат из смолоотделителя	45	9	6	3	33	67
Отстойная смола из конденсатора-холодильника	17	5	25	2	94	6
Отстойная смола из отстойника	13	8	6	3	72	28

Из табл. 103 видно, что фурфурольный конденсат, выделенный из газа смолоотделителем, содержал большое количество воды (до 45%) и летучих кислот (до 9%). После промывки этого конденсата промытая отстойная смола получается в значительной степени обезвоженной (влажность доходит до 6%). Промывка конденсата показала, что в суммарной смоле, осаждаемой из газа смолоотделителем, содержалось 33% отстойной смолы. Это указывает на то, что смола охлажденного газа, выходящего из конденсатора-холодильника, содержала растворимой смолы в 2 раза больше, чем отстойной. В отстойной смоле, выделенной из газа в конденсаторе-холодильнике, содержалось 6% растворимой смолы. Промывка отстойной смолы, полученной при отстаивании суммарного конденсата (смеси конденсатов из смолоотделителя и конденсатора-холодильника), показала, что в этой смоле содержалось 28% растворимой смолы.

При промывке суммарной отстойной смолы 40—55% фурфурола переходит в промывную воду. Иначе говоря, почти половина фурфурола остается в промытой смоле, несмотря на то, что была произведена довольно интенсивная обработка этой смолы горячей водой. Эти данные подтверждают, что растворимость фурфурола в газогенераторной отстойной смоле выше, чем в воде. Очевидно, от фурфурольных газогенераторных суммарных конденсатов (смесь жижки и отстойной смолы) необходимо вначале отгонять фурфурол, а затем производить отмывку водорастворимой смолы от отстойной. Специальные исследования подтвердили этот вывод. Фурфурол легко отгоняется от суммарных конденсатов на обычной ректификационной колонне. Разделение водорастворимой и отстойной смол промывкой после обес-

фурфуроливания происходит весьма эффективно. По данным опытов, влажность обесфурфуроленной смолы после ее промывки составляла 4—6 вместо 16—18% до ее промывки. Содержание летучих кислот соответственно было 2—2,5 вместо 8—10%.

Разгонка отстойной фурфурольной смолы. О влиянии катализатора на выход фенолов можно судить по данным разгонки промытых отстойных смол, полученных из березовой и осиновой древесины. Разгонка производилась в лабораторных условиях при атмосферном давлении. Из табл. 104 видно, что конечная температура разгонки фурфурольной смолы составляла 235—287°. С увеличением влажности исходной смолы обычно увеличивается выход первой отгоняемой фракции (до 110°). В этой фракции содержится вся влага исходной смолы, часть летучих кислот и легких масел. Средняя фракция (110—220°) получалась

Таблица 104

Разгонка промытой отстойной смолы, получаемой при газификации березовой и осиновой щепы с катализатором

Показатели	Контрольные опыты (без пропитки)		Щепа, пропитанная раствором серной кислоты концентрацией					
			0,42%		0,90%		1,20%	
	береза	осина	береза	осина	береза	осина	береза	осина
Продолжительность разгонки смолы, *мин*	50	45	50	35	85	40	95	40
Конечная температура разгонки смолы, °С	266	300	235	261	235	285	280	287
Влажность смолы, %	7,4	4,5	12,5	7,4	17,8	1,2	10,3	8,3
Выход первой фракции (до 110°), % от навески смолы	9,7	6,5	16,8	8,4	31,6	1,8	23,7	10,2
Выход второй фракции (110—220°), % от безводной смолы	3,7	6,1	14,2	13,1	2,9	12,8	13,0	13,6
Выход третьей фракции (220° и выше), % от безводной смолы	40,5	40,8	34,0	29,3	38,6	33,7	19,6	25,1
Выход пека, % от безводной смолы	46,0	45,5	52,0	55,5	52,0	51,5	58,0	54,6
Влажность масел второй и третьей фракций, %	10,2	10,5	11,1	8,7	13,8	6,1	9,6	9,5
Содержание в пересчете на безводные масла, %:								
фенолы	52,4	49,5	55,1	45,2	43,7	45,0	38,8	41,5
нейтральные вещества	29,8	33,1	33,6	21,4	40,1	34,6	37,5	38,0
карбоновые кислоты	4,6	5,7	7,8	5,9	6,4	10,8	9,6	8,6

относительно небольшой (2,9—14,2%). Третья фракция, выкипающая от 220° и выше, была самой значительной (19,6—38,6%); она, как правило, наиболее богата фенолами.

Выход пека от веса абс. сух. смолы колебался от 51,5 до 58%, т. е. примерно на 20% больше количества пека, полученного при разгонке смолы контрольных образцов.

Суммарные масла двух последних фракций подвергались анализу с целью определения в них фенолов, нейтральных веществ и карбоновых кислот. Влажность масел составляла 6,1—11,1%.

Выход фенолов от веса безводной смолы и древесины имеет тенденцию к снижению по мере увеличения концентрации серной кислоты в пропиточном растворе, что объясняется избытком серной кислоты, частично переходящей в газ и усиливающей взаимодействие фенола и фурфурола с образованием нелетучих вторичных смол. По этой причине, очевидно, растет выход пека при разгонке отстойной смолы.

Основные компоненты в фурфурольной смоле обычно содержатся в количествах, характерных для суммарных масел ряда других древесногенераторных смол.

Удельный выход фенолов при работе газогенератора на щепе с катализатором падает в некоторых случаях почти в 2 раза, но зато выход фурфурола увеличивается в несколько раз (от 0,7 до 3,3—3,48%). Поэтому иногда получение фурфурола будет более выгодно, несмотря на частичное уменьшение выхода фенола. Если принять во внимание, что технология выделения фурфурола из газогенераторных конденсатов очень проста по сравнению с получением фенолов, то для ряда случаев производство фурфурола будет более целесообразным. По своему значению фенол и фурфурол почти одинаковы ценны для химических синтезов и особенно для получения пластмасс.

При хранении фурфурольных газогенераторных конденсатов возможно осмоление фурфурола под действием органических кислот и других веществ. Эти процессы могут привести к частичному снижению концентрации фурфурола в жижке и смоле, т. е. может происходить так называемое «старение» конденсатов, что важно знать при организации их перевозки.

Для установления степени этого «старения» в газогенераторных жижке и смоле через различные промежутки времени определяли содержание фурфурола.

Испытываемые смола и жижка одновременно были залиты в колбы. Навеска смолы в каждой колбе равнялась 4 *г*, а жижки 10 *г*. Колбы с пробами плотно закрывались пробками и хранились в темном помещении при температуре 20°. На рис. 25 показано, что при хранении газогенераторных конденсатов более 4 месяцев содержание фурфурола в жижке снижалось с 3,4 до 2%.

Снижение концентрации фурфурола в отстойной смоле не обнаружено. Наблюдалось даже некоторое увеличение содержания фурфурола (с 8,3 до 10,9%). Видимо, находящиеся в смоле одноатомные фенолы недостаточно реакционноспособны, чтобы вступить во взаимодействие с фурфуролом при данных условиях хранения. Кроме того, возможно, что в смоле содержится ряд веществ, оказывающих ингибиторное действие на фурфурол и предохраняющих его от осмоления [39].

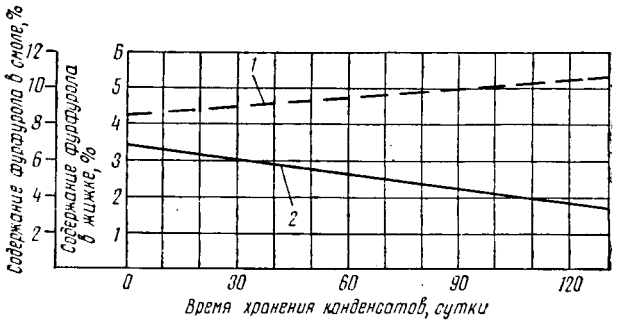


Рис. 25. Содержание фурфурола в газогенераторных конденсатах в зависимости от времени их хранения:
1 — для смолы; *2* — для жижки

Таблица 105

Влияние коры и гнили на выход фурфурола при пиролизе осиновой щепы в лабораторной установке

Исходное сырье	Выход продуктов от веса абс. сух. материала, %					Содержание от веса абс. сух. материала, %	
	угля	фурфурола	летучих кислот (в пересчете на уксусную)	растворимой смолы	отстойной смолы	пентозанов	полиуроновых кислот
Щепа без катализатора	36,5	0,2	5,0	1,5	1,5	20,5	5,5
Щепа с катализатором	37,4	3,5	6,0	0,9	2,0	20,5	5,5
Гниль древесины, пропитанная катализатором	35,5	1,8	3,0	1,4	1,4	18,7	4,7
Кора, пропитанная катализатором	40,4	0,9	3,3	7,8	1,0	13,4	8,9
Щепа без коры и гнили, пропитанная катализатором	41,0	4,9	8,5	1,0	2,0	23,6	6,7

Примечание. Гниль вызвана дереворазрушающим грибком — ложным трутовиком (Fomes igniarins).

Влияние гнили древесины и коры на выход фурфурола. Для выяснения влияния коры и гнили древесины на выход фурфурола проводились лабораторные опыты с осиновой щепой, подвергавшейся перед опытом пропитке раствором серной кислоты концентрацией 0,9% при модуле 1 : 4. Влажность щепы до пропитки составляла 8%, а после пропитки и подсушки 20—25%, продолжительность процесса пиролиза в реторте 3—3,5 *ч* при конечной температуре 350°. Результаты этих опытов приведены в табл. 105, из которой видно, что выход фурфурола из гнили и коры значительно ниже, чем из исходной и особенно из древесины, не подвергшейся разрушению.

Содержание пентозанов в гнили и коре заметно ниже, чем в исходной и здоровой древесине, что совпадает с уменьшением выхода фурфурола. Опыт газификации березовой щепы подтвердил, что гниль отрицательно влияет на выход фурфурола (табл. 106).

Таблица 106

Выход фурфурола при газификации с катализатором березовой щепы, содержащей кору и гниль

Показатели	Опыты	
	1	2
Содержание в березовой щепе, %:		
гнили	Нет	3,1
коры	9,1	11,9
Содержание в пересчете на абс. сух. щепу, %:		
пентозанов	25,3	20,6
полиуроновых кислот	5,6	5,8
Влажность щепы при загрузке в газогенератор, %	26,4	24,0
Выход фурфурола от веса абс. сух. щепы, %	4,01	3,08

Примечание. Березовая щепа была подвергнута пропитке раствором серной кислоты концентрацией 0,9%.

Влияние температурного режима сушки щепы на выход фурфурола. Влияние повышенного температурного режима сушки щепы можно представить по-разному. По первому варианту предполагается, что при повышенной температуре во время сушки щепы, смоченной раствором серной кислоты, происходит нагревание древесины, что способствует гидролизу пентозанов с образованием пентоз. При дальнейшем нагревании щепы в шахте газогенератора протекает процесс дегидратации пентоз с образованием фурфурола.

По второму варианту процесс можно представить так. Во время сушки щепы в сушилке при повышенной температуре гидролиз пентозанов происходит одновременно с дегидратацией пентоз. Образовавшийся фурфурол выносится из сушилки с теплоносителем и теряется. Поэтому выход фурфурола при газификации щепы, высушенной при повышенных температурах, будет меньше выхода фурфурола при газификации щепы, высушенной, например, в естественных условиях.

Сырьем для опытов служила сухая березовая щепа ($W = 12 \div 14\%$) средневзвешенного размера 27 *мм*. В качестве пропиточной жидкости использовался раствор серной кислоты концентрацией 0,904%. Модуль пропитки 1 : 4, температура пропитки 14—16°. После пропитки привес щепы составлял 70—80%, влажность 53—55%.

Одна часть сырой щепы после пропитки высушивалась в естественных условиях (воздушная сушка) при температуре 10—18°, а другая — при непрерывном перемешивании в сушилке полочного типа. В сушилке в качестве теплоносителя использовался дымовой газ с температурой 130—160°. Продолжительность сушки 35—45 *мин*. За это время щепа в сушилке нагревалась до 46—70°.

Газификация березовой щепы с катализатором, высушенной при различных температурных режимах, производилась по 1-й схеме (табл. 107).

Таблица 107

Опыты газификации березовой щепы с катализатором, высушенной при различных температурных режимах

Показатели	Щепа без пропитки	Щепа после пропитки и сушки при температуре	
		130—160°	10—18°
Относительная влажность щепы, загружаемой в газогенератор, %	26,7	26,6	27,1
Производительность газогенератора по абс. сух. щепе, *кг/ч*	32	30	32
Выход суммарного конденсата с 1 пл. $м^3$ щепы, *кг*	374	333	341
В том числе, %:			
жижки	85	91	86
отстойной смолы	15	9	14
Выход газа в пересчете на абс. сух. щепу, $нм^3/кг$	1,28	1,38	1,34

Из табл. 108 видно, что более высокий температурный режим сушки щепы после пропитки ее раствором катализатора не способствовал повышению концентрации фурфурола в отстойной смоле и жижке. Так, газогенераторные конденсаты, полученные

из щепы, подсушенной при низких температурах, содержали фурфурол на 5—20% больше, чем конденсаты из щепы, подсушенной при температуре 130—160°.

Таблица 108

Анализ жижки и отстойной смолы, полученных при газификации березовой щепы с катализатором, высушенной при различных температурных режимах

Исходное сырье	Анализ жижки						Анализ отстойной смолы			
	фурфурол, %	летучие кислоты (в пересчете на уксусную), %	растворимая смола, %	метиловый спирт, %	эфиры (в пересчете на метилацетат), %	удельный вес при 20°	фурфурол, %	летучие кислоты (в пересчете на уксусную), %	влажность, %	удельный вес при 20°
Щепа без пропитки	—	10,1	14,9	1,01	0,68	1,076	—	6,0	20,4	1,117
Щепа после пропитки и сушки при температуре, °С:										
130—160	3,81	8,7	9,1	0,95	0,68	1,061	11,3	6,1	21,9	1,136
10—18	4,55	8,3	12,7	0,87	0,32	1,071	12,0	5,3	19,1	1,144

В конденсаторе-холодильнике в среднем улавливалось 50% фурфурола, 63% летучих кислот, 15% смолы, 88% воды, а в смолоотделителе 50% фурфурола, 37% летучих кислот, 85% смолы и 12% воды. Эти данные подтверждают заключение о высокой сорбционной способности отстойной смолы по отношению к фурфуролу.

Из табл. 109 видно, что сушка щепы при повышенных температурах отрицательно влияла не только на выход фурфурола, количество которого снизилось на 23%, но и на выход смолы (на 32%).

При промывке горячей водой суммарной отстойной смолы ее влажность уменьшалась с 19—22 до 5—14%, а фурфурол отмывался от смолы на 40—55%. Остальное количество фурфурола оставалось в промытой смоле. Полученные результаты согласуются с ранее сделанными заключениями о влиянии промывки на качество смолы.

Промытая отстойная смола подвергалась разгонке при атмосферном давлении (табл. 110). Сопоставляя приведенные выше данные, можно сделать вывод, что при газификации березовой щепы с катализатором за счет снижения выхода ценного продукта — фенола примерно на 0,5—1% от веса абс. сух. щепы достигался высокий выход фурфурола (3,7—4,8%). Сушка щепы

Таблица 109

Выход жидких продуктов при газификации березовой щепы с катализатором, высушенной при различных температурных режимах (в % от веса абс. сух. щепы)

Жидкие продукты	Щепа без пропитки	Сушка щепы после пропитки раствором катализатора при температуре	
		130—160°	10—18°
Фурфурол	—	3,7	4,8
Летучие кислоты (в пересчете на уксусную)	8,7	7,0	6,7
Смола	22,2	11,5	16,9
В том числе:			
отстойная	7,3	4,8	6,5
растворимая	14,9	6,7	10,4
Метиловый спирт	0,92	0,8	0,7
Эфиры (в пересчете на метилацетат)	0,6	0,5	0,26

при повышенной температуре приводила не только к снижению выхода фурфурола, но и к уменьшению выхода фенолов и других продуктов, содержащихся в отстойной смоле.

Таблица 110

Разгонка отстойной промытой смолы, полученной при газификации березовой щепы с катализатором, высушенной при различных температурных режимах

Показатели	Газификация березовой щепы		
	без пропитки	высушенной после пропитки при температуре	
		130—160°	10—18°
Конечная температура разгонки, °С	247	234	251
Выход от веса безводной смолы, %:			
пека	40,3	50,0	42,9
безводных масел	46,9	41,1	44,4
Содержание в пересчете на безводные масла, %:			
фенолов	52,5	42,2	44,3
нейтральных веществ	30,6	35,8	31,4
карбоновых кислот	8,4	11,3	9,3
Выход от веса абс. сух. щепы, %:			
фенолов	1,80	0,83	1,28
нейтральных веществ	1,04	0,70	0,91
карбоновых кислот	0,29	0,22	0,27

Выделение из газогенераторных конденсатов фурфурола и синтез на основе его тетрагидрофурилового спирта. Газогенераторный фурфурольный конденсат, полученный из осиновой щепы и содержащий 16% отстойной смолы, был подвергнут перегонке на периодически действующей установке с ректификационной колонкой насадочного типа диаметром 220 *мм* и высотой 3000 *мм*. Содержимое нагревалось глухим паром (3 *ати*) через рубашку (рис. 26). Температура жидкости в кубе при перегонке была равна 101—103°, а число флегмы составляло 3—4.

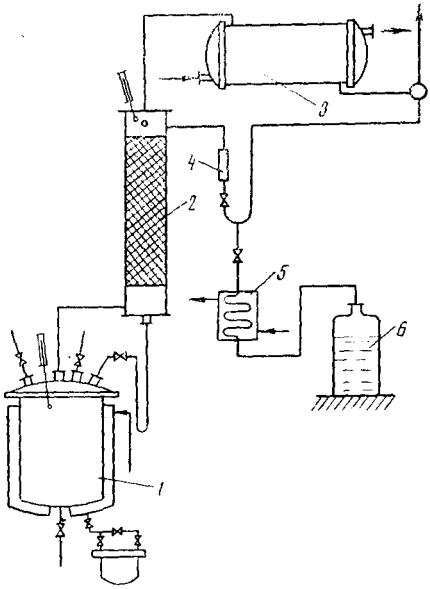


Рис. 26. Схема периодически действующей установки для отгонки фурфурола из газогенераторного конденсата:

1 — куб с рубашкой полезной емкостью 250 *л*; *2* — насадочная колонна высотой 3000 *мм*, диаметром 220 *мм*; *3* — дефлегматор с поверхностью охлаждения 1,2 $м^2$; *4* — ротаметр; *5* — холодильник с поверхностью охлаждения 0,7 $м^2$; *6* — приемник дистиллята

Анализ исходного конденсата: жижки (в %) — летучие кислоты (в пересчете на уксусную) 8,9, растворимая смола 16,4, фурфурол 2,1; отстойной смолы (в %) влажность 18,6, летучие кислоты 7,3, фурфурол 9.

Перегонка газогенераторного конденсата производилась следующим образом. Колонна работала 1 *ч* без отбора продуктов. При температуре 65—75° отбиралась спиртовая фракция (4% от загрузки). После отгонки спиртовой фракции при температуре паров 96° отбиралась вторая фракция, содержащая фурфурол. Фурфурол, образуя с водой азеотропную смесь, отгонялся в виде расслаивающегося конденсата: нижний слой — фурфурольный, а верхний слой состоял из воды, содержащей примерно 8% фурфурола. Второй фракции получилось 17% от загрузки.

Нижний слой представлял собой фурфурол-сырец коричневого цвета; удельный вес его при 20° 1,11, общая кислотность (в пересчете на уксусную) 1,95%, содержание фурфурола 68,4%. Кубовый остаток после перегонки конденсата содержал 0,1% фурфурола.

Полученный фурфурол-сырец направлялся для дальнейших исследований, а спирт-сырец и фурфурольная вода, отстоявшаяся от фурфурола-сырца, не использовались. Отметим, что

в производственных условиях спирт-сырец и фурфурольная вода должны подвергаться соответствующей переработке. Из приведенного ниже баланса видно, что почти 90% фурфурола, содержащегося в исходном газогенераторном конденсате, отогнано и переведено в спиртовую фракцию, фурфурол-сырец и фурфурольную воду.

Материальный баланс отгонки фурфурола от газогенераторного конденсата в пересчете на 100%-ный фурфурол (в %)

Приход

Загружено фурфурола в куб с газогенераторным конденсатом (в жижке и отстойной смоле)	100

Расход

Получено фурфурола:	
в спиртовой фракции	5,6
в фурфуроле-сырце	55,0
в фурфурольной воде, отстоявшейся от фурфурола-сырца	29,2
в кубовом остатке	2,2
Потери	8,0

Очистка фурфурола-сырца производилась путем ректификации после его предварительной нейтрализации 5%-ным раствором бикарбоната натрия. Смесь фурфурола-сырца и раствора бикарбоната натрия тщательно перемешивалась, а затем в течение 40 *мин* отстаивалась. Потери фурфурола за счет растворения его промывной жидкости составляли 12%. В производственных условиях промывную воду можно использовать для выделения фурфурола путем обычной ректификации. Кислотность фурфурола-сырца после обработки его бикарбонатом натрия уменьшилась с 1,95 до 0,1%, Очистка нейтрализованного фурфурола-сырца производилась двумя способами.

Первый способ. Фурфурол-сырец загружался в куб лабораторной ректификационной периодически действующей установки, работающей при атмосферном давлении. Колонка насадочного типа изготовлена из стеклянной трубки диаметром 20 *мм*, высотой 1060 *мм*. Число теоретических тарелок, установленных опытным путем, равнялось 15. Насадка представляла собой стеклянные кольца диаметром 2 *мм*. Колонка снабжена кожухом с электрообогревом и асбестовой теплоизоляцией. Обогрев куба — электрический. До температуры 75° отгонялись легколетучие вещества в количестве 1%, считая от загрузки. При температуре 97—98° отгонялась водно-фурфурольная фракция в количестве 10% от загрузки. В водном слое содержалось 8,5% фурфурола, в нижнем слое 80%. При отгонке водно-фурфурольной фракции число флегмы поддерживалось 2—2,5.

При температуре 159—162° при флегмовом числе 3—4 отгонялся фурфурол со следующей характеристикой: удельный вес

при 20° 1,147, коэффициент рефракции 1,5215, содержание фурфурола 95,2%. Фурфурол получался светло-желтого цвета, но быстро темнел. Кубовый остаток (примерно 25%, считая от загрузки) представлял собой коричневую густую массу, в которой содержалось 50% фурфурола. Ниже приведен материальный баланс этого опыта.

Материальный баланс очистки фурфурола-сырца путем ректификации при атмосферном давлении в пересчете на 100%-ный фурфурол (в %)

Приход

Нейтрализованный фурфурол-сырец	100

Расход

Водно-фурфурольная фракция	3
Основная фракция, содержащая 95,2% фурфурола	80
Кубовый остаток	12
Потери	5

Второй способ. Ректификация нейтрализованного фурфурола-сырца производилась в периодически действующей лабораторной вакуум-колонке насадочного типа диаметром 12 *мм*, высотой 1150 *мм*. Насадка представляла собой одновитковые спирали диаметром 2 *мм* и стеклянные кольца диаметром 3 *мм* и высотой 5 *мм*.

Колонка имела электрообогрев с двойной воздушной рубашкой. Число теоретических тарелок колонки равнялось 17. Отбор основной фракции фурфурола производился при температуре в верху колонны 84—85° и остаточном давлении 60 *мм* рт. ст. Температура в кубе была 90—92°. Ректификация прекращалась при температуре в верху колонны 100° и остаточном давлении 30 *мм* рт. ст. Основная фракция фурфурола получалась худшего качества, чем в опыте ректификации фурфурола при атмосферном давлении (первый способ). Показатели качества фурфурола при ректификации его под вакуумом следующие: удельный вес при 20° 1,141, коэффициент рефракции 1,521, содержание фурфурола 92%. Ниже приведен материальный баланс вакуумной ректификации нейтрализованного фурфурола-сырца.

Материальный баланс очистки фурфурола-сырца методом вакуумной ректификации в пересчете на 100%-ный фурфурол (в %)

Приход

Нейтрализованный фурфурол-сырец	100

Расход

Головная фракция	3
Основная фракция, содержащая 92% фурфурола	89
Кубовый остаток	5
Потери	3

Повторная вакуум-ректификация фурфурола, полученного при первой вакуум-ректификации, дала следующие результаты (в пересчете на 100%-ный фурфурол): головная фракция 1,3%; основная фракция 94%; кубовый остаток 2,7%; потери 2%. Фурфурол после двойной вакуум-перегонки обладал следующими показателями: удельный вес при 20° 1,152; коэффициент рефракции 1,5230; содержание фурфурола 98,5%. Как видно из этих данных, при двойной вакуумной ректификации нейтрализованного фурфурола можно получить конечный продукт высокого качества.

Полученный образец фурфурола, по заключению НИИГС, отвечал требованиям, предъявляемым к фурфуролу 2-го сорта по ГОСТ 10437 — 63.

При использовании более эффективной ректификационной аппаратуры, т. е. колонны с бо́льшим числом тарелок, а также при лучшей нейтрализации фурфурола-сырца можно улучшить качество товарного фурфурола.

При хранении очищенных газогенераторного и гидролизного фурфуролов были проведены следующие сравнительные наблюдения: свежеперегнанные фурфуролы в закрытых прозрачных стеклянных колбах были поставлены на хранение при свободном дневном освещении. Гидролизный фурфурол через 150 *ч* приобрел темную окраску вследствие осмоления. Газогенераторный фурфурол и через 750 *ч* сохранял желтоватую окраску. Это указывает на то, что очевидно, в газогенераторном фурфуроле имеется ничтожное количество примесей (например, фенолов), оказывающих ингибиторное действие на фурфурол и предохраняющих его от быстрого осмоления.

На основе полученного газогенераторного фурфурола был произведен синтез тетрагидрофурилового спирта. Были испытаны два образца фурфурола: фурфурол, очищенный при двухкратной вакуумной ректификации, и фурфурол, очищенный только при одной вакуумной ректификации.

Результаты гидрирования фурфурола в том и другом случае были почти одинаковыми. Гидрирование газогенераторного фурфурола осуществлялось в жидкой фазе при температуре 160—170° и непрерывной подаче водорода под давлением 100 *атм* в автоклаве из нержавеющей стали.

Обычно при получении тетрагидрофурилового спирта на основе гидролизного фурфурола, отвечающего требованиям ГОСТ 10437—63, производится четыре-пять генераций. После этого катализатор теряет свои активные свойства и выход спирта падает до 60—70% от теоретически возможного.

Синтез тетрагидрофурилового спирта без смены катализатора на основе исследуемого газогенераторного фурфурола производился до 8 раз. Выход спирта при каждой генерации не снижался и составлял 95%. Эти данные указывают на то, что

газогенераторный фурфурол, удовлетворяющий требованиям, предъявляемым к фурфуролу 2-го сорта, по реакционным свойствам оказался выше гидролизного фурфурола 1-го сорта.

Если осуществить выделение фурфурола из фурфурольных вод и головных фракций, а также организовать более полный отбор фурфурола из кубовых остатков, то можно получить из газогенераторного конденсата 80% очищенного фурфурола (в пересчете на 100%-ный фурфурол). На основе указанных выше результатов получения тетрагидрофуролового спирта можно предполагать, что синтез других продуктов из газогенераторного фурфурола будет протекать с удовлетворительными показателями. Проведенные исследования указывают на то, что фурфурол из газогенераторного конденсата выделяется простейшим способом — ректификацией, т. е., несомненно, проще, чем фенол из этих же конденсатов. Выход же фурфурола при газификации щепы с применением катализаторов (серной кислоты) в несколько раз больше, чем фенола. На основании изложенного можно предположить, что иногда целесообразнее организовать энергохимическую переработку щепы лиственных пород с применением кислых катализаторов, например серной кислоты. Снижение выхода фенолов в этих случаях не будет, очевидно, иметь значения.

15. ОПЫТ ГАЗИФИКАЦИИ ХВОИ

Выше было сказано, что с повышением содержания хвои в исходной щепе выходы смолы и других продуктов снижаются.

Такое заключение сделано на основании результатов, полученных при газификации лесосечных отходов, содержащих хвою и без нее. Для подтверждения этого вывода был проведен опыт газификации чистой еловой хвои, не содержащей ни коры, ни древесины.

Относительная влажность хвои 16,8%; насыпной вес 127 *кг/м*^{3}. Химический состав приведен в табл. 15.

Интенсивность газификации по абс. сух. хвое 150 *кг/м*$^2 \cdot$ *ч*. Установка работала по 2-й схеме. Температура дутья 11°, парогазов в горловине газогенератора 68°, после смолоотделителя 48°, после конденсатора-холодильника 20°.

Давление дутья 13 *мм* вод. ст., разрежение в горловине газогенератора 22 *мм* вод. ст.

Конденсаты из конденсатора-холодильника и смолоотделителя после подогрева до 80°, смешивания и отстоя содержали 79% жижки, 21% всплывной смолы. Анализ жижки (в %): летучих кислот (в пересчете на уксусную) 6,2; метилового спирта 0,62; эфиров (в пересчете на метилацетат) 1,04; растворимой смолы 8,8; других органических веществ 2,26. Удельный вес при 20° 1,16. Анализ всплывной смолы (в %): летучих кислот (в пере-

счете на уксусную) 3,4; влажность 22,5. Удельный вес при 20° 1,05. При промывке всплывной смолы горячей водой получено безводной промытой смолы 80% от исходной смолы (в пересчете на абс. сух.). Анализ промытой смолы: летучих кислот (в пересчете на уксусную) 0,57%, влажность 50,1%, удельный вес при 20° 1,02. Высокая влажность промытой всплывной смолы объясняется очень плохим отстаиванием ее вследствие низкого удельного веса. Выход продуктов газификации от веса абс. сух. хвои (в %): летучих кислот (в пересчете на уксусную) 3,5; метилового спирта 0,32; эфира (в пересчете на метилацетат) 0,54; растворимой смолы 5,3; отстойной смолы 8,7; реакционной воды 28. В пересчете на абс. сух. хвою расход дутья составлял 1,61 *нм³/кг*, а выход газа 2,16 *нм³/кг*. Анализ газа (в объемных %): CO_2 — 4; CO — 29,4; CH_4 — 1,3; H_2 — 6; N_2 — 59. Анализ отстойной смолы без разгонки (в %): веществ, не растворимых в серном эфире 6,5, в том числе механических примесей 1,4; нейтральных веществ 39; карбоновых кислот 5,3; фенолов 45, в том числе высокомолекулярных кислот 20. Относительно большое количество нейтральных веществ в смоле объясняется наличием в исходном сырье (хвое) эфирных масел и других органических нейтральных веществ, растворимых в органических растворителях (36,8%).

Из результатов исследований видно, что хвоя по выходу жидких продуктов и газа приближается к чистой коре, но резко отличается от стволовой древесины (см. табл. 20 и 66). Проведенные опыты подтверждают нецелесообразность использования хвои как сырья для газификации.

16. ОПЫТ ГАЗИФИКАЦИИ ЩЕПЫ С ОТБОРОМ УГЛЯ ИЗ ГАЗОГЕНЕРАТОРА

На некоторых ГГУ возникают затруднения со сбытом газа. Для уменьшения удельного выхода газа интересно проверить на опыте ГГС, работающих на другом сырье (битуминозных углях), возможность отбора древесного угля из высокотемпературной зоны газогенератора. Опыты производились на еловой щепе с относительной влажностью 16%. Уголь отбирался из шахты газогенератора при температуре 900—1000° в количестве 7—8%, считая от веса абс. сух. щепы. Точка отбора угля расположена на 250—300 *мм* выше уровня подачи дутья. В пробах газа, отбираемых из зоны отбора угля, содержалось (в объемных %): CO_2 — $0,5 \div 1$; O_2 — $0,2 \div 0,5$; CO — $30 \div 32$.

По сравнению с контрольным опытом при газификации щепы с отбором угля главным образом снижался выход растворимой смолы на 12—15% и летучих кислот на 20—25%. Анализ угля в пересчете на абс. сух. навеску (в %): содержание золы 2,5—3, летучих органических веществ 3,5—4. При газификации щепы по данной схеме выход генераторного газа снижался на 25—30%.

Выход угля можно несколько увеличить без существенного снижения выхода жидких продуктов (смол).

Пределы допустимого отбора угля зависят от размеров газогенератора, его производительности, влажности щепы и др.

17. СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ ВЫХОДОВ ЖИДКИХ ПРОДУКТОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ГАЗИФИКАЦИИ ДРЕВЕСИНЫ НА ОПЫТНОЙ УСТАНОВКЕ ЛТА И ПРОМЫШЛЕННЫХ ГГУ

Приведенные в табл. 111 данные указывают на то, что опытный материал по выходам жидких продуктов (особенно по смоле), полученный на установке ЛТА, можно с достаточной уверенностью распространить на промышленные ГГУ.

Таблица 111

Сравнительные данные о выходах некоторых жидких продуктов, полученных на опытной и промышленных ГГУ

Вид газифицируемой щепы	Относительная влажность щепы, %	Выход жидких продуктов от веса абс. сух. щепы, %		Газогенераторная установка
		суммарные смолы	летучие кислоты (в пересчете на уксусную)	
Из осиновых дров	24—26	16—21	5,7—6,6	Промышленная Амзинская
	20—28	19—21	6,7—6,8	Опытная ЛТА
Из осиновых дров	49—51,6	9,86—13,9	2,23—2,3	Промышленная Прилукская
	47,6	12,8	4,25	Опытная ЛТА
Из еловых дров	41,5	20,7	4,4	Промышленная Прилукская
	39,0	17,5	4,8	Опытная ЛТА
Из лесосечных отходов Верховского леспромхоза, содержащих 18—25% коры, 12—15% хвои, 60—70% древесины	20,5	15,0	2,6	Промышленная Верховская
	23,0	15,4	3,6	Опытная ЛТА

Выходы летучих кислот, видимо, вследствие более полной степени улавливания их в аппаратах установки ЛТА оказались несколько более высокими, чем на промышленных ГГУ.

ГЛАВА III

ТИПЫ И КОНСТРУКЦИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ГАЗОГЕНЕРАТОРОВ ДЛЯ ДРЕВЕСИНЫ

1. ДРОВЯНЫЕ ГАЗОГЕНЕРАТОРЫ

Для газификации древесины в виде метровых дров и швырка на старых стекольных и металлургических заводах Урала применялись примитивные самодувные газогенераторы, носящие название дровяных газогенераторов и представляющие собой кирпичные шахты прямоугольного сечения высотой 5—6 *м*. На рис. 27 и 28 представлены общие виды дровяных газогенераторов.

Обычно шахты устанавливаются по нескольку штук в одном блоке и непосредственно примыкают к соответствующим печам или располагаются от них на небольшом расстоянии. Воздух в газогенератор поступает под колосниковую решетку за счет естественной тяги (разрежения), создаваемой дымовой трубой печей, потребляющих газ. Удельная производительность (интенсивность газификации) таких газогенераторов весьма небольшая и составляет в пересчете на абс. сух. древесину 50—90 $кг/м^2 \cdot ч$.

Парогазовая смесь, получающаяся при газификации дров, без охлаждения поступает в печи, в которых сгорает не только газ, но и жидкие продукты, содержащиеся в нем. В настоящее время таких примитивных газогенераторов в промышленной практике не существует. Эти газогенераторы постепенно вытеснены более совершенными и производительными аппаратами. С целью повышения производительности дровяных газогенераторов на ряде заводов было успешно применено искусственное дутье, благодаря чему производительность увеличивалась в 2—3 раза. Но из-за повышенного давления при искусственном дутье возникали потери газа через кирпичную кладку шахты и другие неплотности в газовой системе. На некоторых заводах в дровяных газогенераторах вместо метровых дров и швырка использовалась щепа, что позволило повысить качество газа и улучшить условия работы на газогенераторах. Однако щепяные

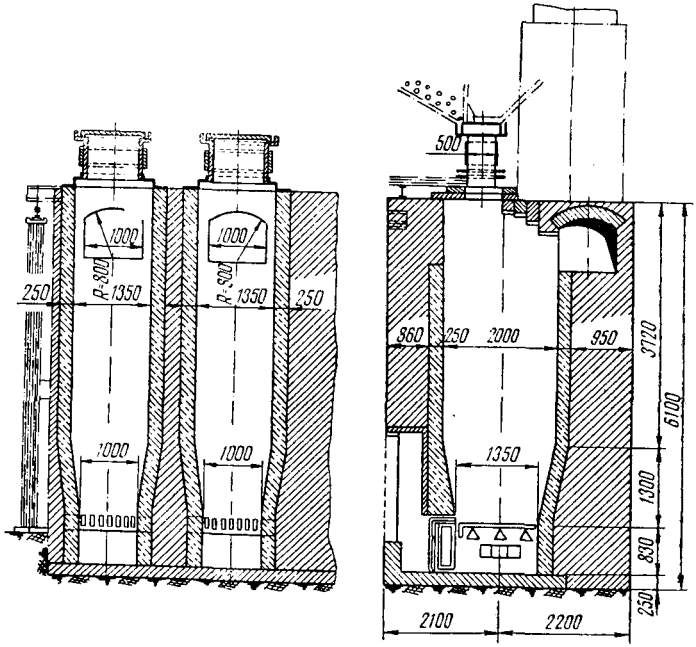


Рис. 27. Газогенератор для дров Нижнетагильского металлургического завода

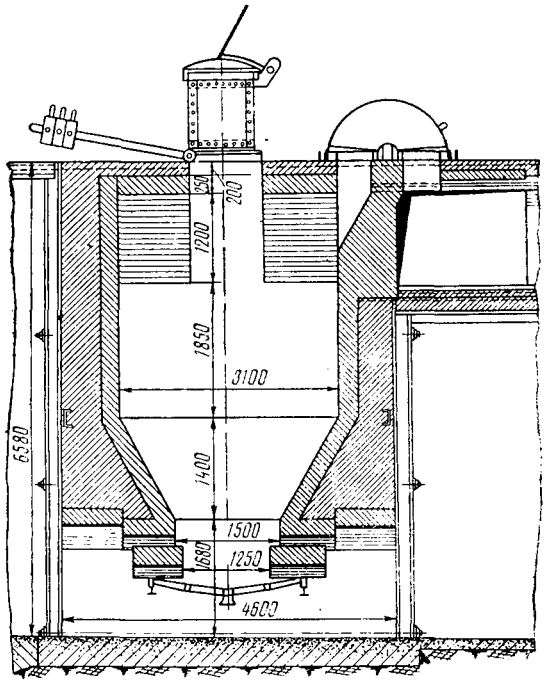


Рис. 28. Газогенератор для дров Бытошевского стеклозавода

кирпичные газогенераторы также не сохранились в промышленной практике. Одной из основных причин замены древесного топлива бурыми углями, торфом и др. является то, что дрова до сего времени считаются более дорогим топливом.

Газогенераторные установки (ГГУ) обычно являются вспомогательными цехами металлургических, стекольных и других заводов. Современные ГГУ используют древесину в виде

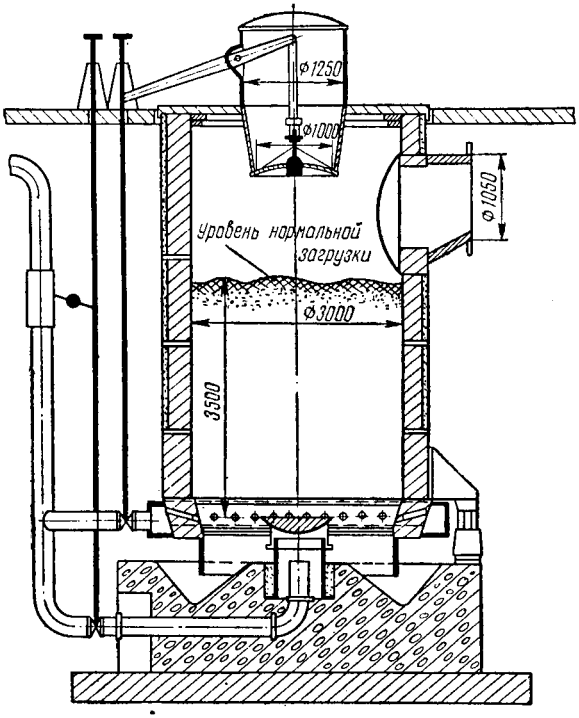


Рис. 29. Газогенератор для щепы конструкции проф. Пильника

щепы с целью повышения теплоты сгорания газа, что в свою очередь позволяет увеличить производительность потребителей газа (печей); резкого увеличения производительности газогенераторов и снижения норм расхода газа на единицу вырабатываемой продукции; улучшения обслуживания газогенератора, а также осуществления механизации топливо-приготовления; использования для газификации сырой древесины без ухудшения качества газа; одновременного обеспечения газом нескольких потребителей, расположенных в удаленных точках от газогенераторной станции; получения лесохимикатов для снабжения потребителей более дешевым газом.

2. ГАЗОГЕНЕРАТОРЫ КОНСТРУКЦИИ ПРОФ. ПИЛЬНИКА

Эти газогенераторы (рис. 29) представляют собой цилиндрическую шахту диаметром 3000 *мм* и полезной высотой топлива до 3500 *мм*. Золоудаление и загрузка древесного топлива производятся вручную. В качестве топлива используется щепа среднего измельчения 45—65 *мм* с относительной влажностью 40—45%.

Во время работы газогенераторов удаление золы невозможно вследствие неудачной конфигурации зольной чаши. Через 1—1,5 месяца газогенераторы останавливаются, шахта охлаждается и зола выбрасывается вручную через боковой лаз. Средняя удельная производительность газогенераторов, считая по абс. сух. древесине, невелика — 120—150 *кг/м*$^2 \cdot$ *ч*.

Газогенераторы этого типа работают при свободном слое топлива, поэтому температура газа на выходе из горловины неустойчива. Такими газогенераторами оборудована газогенераторная станция (ГГС) Чагодощинского стеклозавода. Средняя эксплуатационная производительность каждого газогенератора в пересчете на абс. сух. щепу составляет 18—20 *т/сутки*, или 12—15 тыс. *пл. м*^{3}*/год*.

Чагодощинская ГГС эксплуатируется более 35 лет. Из-за перебоев в подаче древесины иногда приходится совмещать газификацию щепы и торфа.

3. ГАЗОГЕНЕРАТОРЫ ИЖЕВСКОЙ ГАЗОГЕНЕРАТОРНОЙ СТАНЦИИ

Газогенераторы Ижевской ГГС (рис. 30) имеют в верхней части суженную швельшахту, механизированное золоудаление и удобные приспособления для шуровки топлива. Шахта газогенератора футерована кирпичом. Подача паровоздушного дутья производится частично через колосниковую решетку дутьевой головки, установленной в центре вращающейся зольной чаши. Основное дутье осуществляется через фурмы, расположенные в стенке шахты на уровне центральной дутьевой головки.

Рабочий период отдельных газогенераторов составляет 6—10 месяцев. В качестве топлива используется сырая щепа размером 60—80 *мм* ($W = 40 \div 50\%$) из дров, а также дробленка из лесосечных отходов, содержащих хвою и листья. Интенсивность газификации по абс. сух. щепе 250—350 *кг/м*$^2 \cdot$ *ч*.

На этой же газогенераторной станции более 10 лет работал модернизированный газогенератор (рис. 31), у которого верхняя часть шахты была расширяющейся. Для отбора газа служили две горловины, смонтированные на крышке. Отличительной особенностью модернизированного газогенератора являлась повышенная производительность по исходной древесине.

Существенное улучшение эксплуатации газогенераторов было достигнуто после того, как к ним смонтировали фурмы для периферийного дутья и улучшили отбор газа из шахты. При

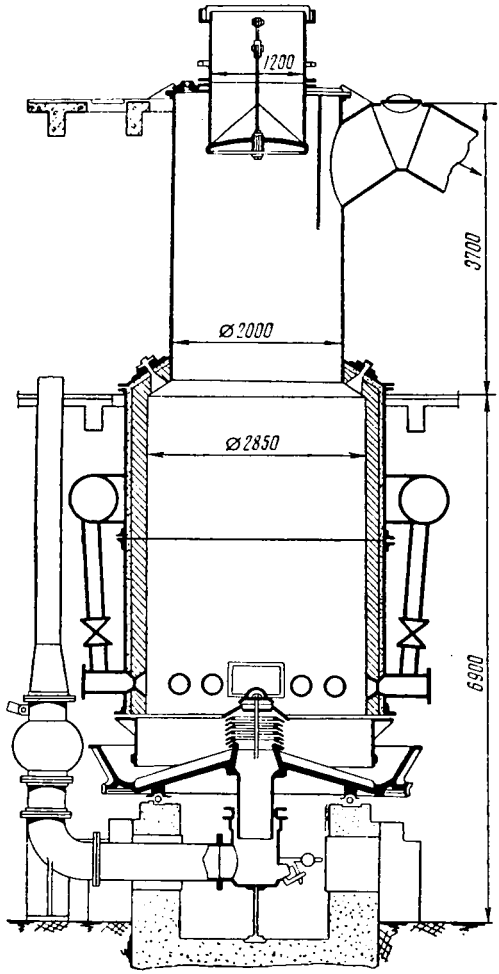


Рис. 30. Газогенератор для щепы Ижевской газогенераторной станции с периферийным дутьем и суженной швельшахтой

работе газогенераторов только на одном центральном дутье средняя безостановочная продолжительность работы газогенераторов составляла 2300 *ч*, или около 3,5 месяцев, а средняя продолжительность простоев равнялась 600 *ч*, т. е. примерно 20% времени газогенераторы простаивали. Простои вызывались

следующими причинами: выходом из строя колосниковой решетки (43%), чисткой горловин и гидрозатворов (33%), авариями из-за сильных хлопков (5%), другими причинами (19%).

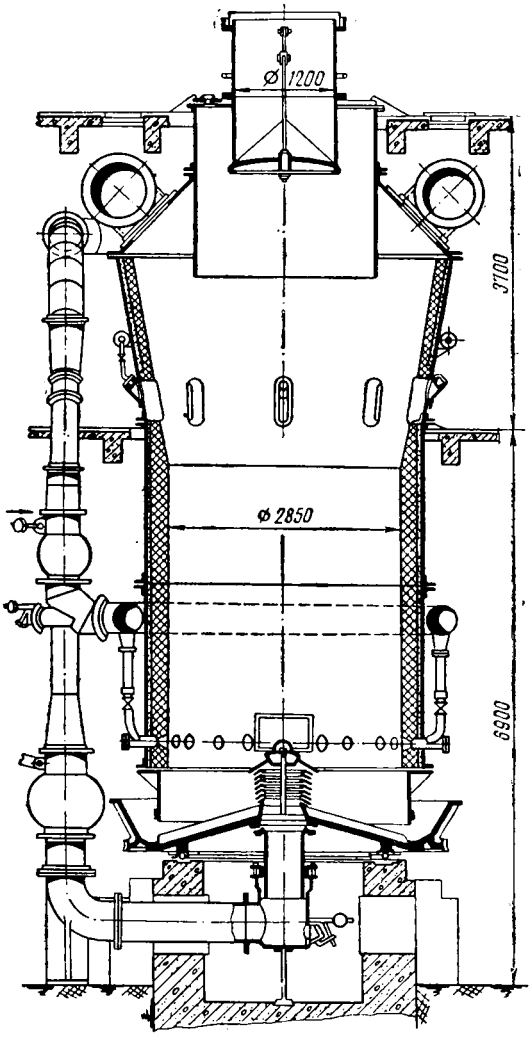


Рис. 31. Газогенератор для щепы Ижевской газогенераторной станции с периферийным дутьем и расширяющейся швельшахтой

Более чем за 30-летнюю эксплуатацию технологический процесс всей станции и, в частности, газогенераторов освоен удовлетворительно. За последние годы средняя производительность газо-

генераторов по абс. сух. щепе доведена до 45—50 *т/сутки*, а количество перерабатываемой каждым газогенератором древесины составляет в среднем 30—35 тыс. *пл. м*³/год.

4. ГАЗОГЕНЕРАТОРЫ СЕГЕЖСКОЙ ГАЗОГЕНЕРАТОРНОЙ СТАНЦИИ

Сегежая ГГС оборудована газогенераторами (рис. 32), аналогичными Ижевским, с той лишь разницей, что нижняя шахта вместо кирпичной футеровки имеет стальную водяную рубашку, предупреждающую зашлаковывание стенок. В качестве топлива использовалась сосновая щепа влажностью 40—45%. Размер щепы 40—60 *мм*. Интенсивность газификации по абс. сух. древесине 130—160 *кг/м*² · *ч*. Подача дутья производится только через центральную колосниковую решетку. Температура паровоздушного дутья 45—50°.

5. НЕДОСТАТКИ ГАЗОГЕНЕРАТОРОВ С СУЖЕННОЙ ШВЕЛЬШАХТОЙ И ЦЕНТРАЛЬНЫМ СПОСОБОМ ПОДАЧИ ДУТЬЯ

Газогенераторы этого типа хорошо зарекомендовали себя при газификации высокозольных топлив (например, бурого угля). Шлак способствует распределению воздуха по сечению шахты, особенно при вращающейся зольной чаше. В крышке газогенератора и на заплечиках шахты расположены отверстия, через которые удобно производить шуровку топлива стальными штангами для разрушения сводов и «козлов», образующихся вследствие спекания угля, смолы и пыли. Пароводяная рубашка в нижней части шахты газогенератора также весьма успешно служит для предотвращения зашлаковывания. Некоторые конструктивные особенности таких газогенераторов, необходимые для работы на буром угле, оказались ненужными или даже вредными для щепы, хотя она тоже относится к битуминозным топливам. Неправильное заимствование отдельных деталей буроугольных газогенераторов в конструкциях газогенераторов для щепы привело к ряду производственных неполадок.

Обвалы топлива в шахте. Из-за небольшого количества золы, образующейся при газификации древесины, и ее мелкозернистой структуры колосниковая решетка дутьевой головки недостаточно защищена от действия высокой температуры.

Колосники часто разрушались и выходили из строя. Кроме того, чистка колосников невозможна, вследствие чего нельзя обеспечить равномерное распределение дутья по всему сечению газогенератора. Это приводило к частым прогарам, к однобокому горению топлива в шахте, в результате чего возникали обвалы топлива, сопровождающиеся сильными хлопками (взры-

вами). Установлено, например, что у газогенераторов, работающих с бо́льшей производительностью, хлопки наблюдались чаще и были более сильными.

Унос щепы с газом из газогенератора. Скорость газа при выходе его из слоя щепы при нормальной производительности

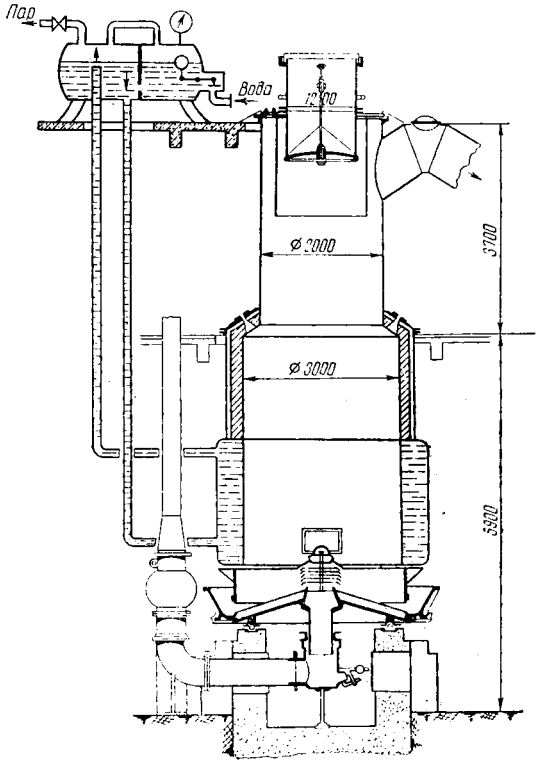


Рис. 32. Газогенератор для щепы Сегежской газогенераторной станции с центральным дутьем и пароводяной рубашкой

газогенератора достигала 1—1,5 *м/сек*. При такой скорости щепа выносилась с газом в горловину и гидрозатвор, а затем в газопровод. Унос щепы при увеличении форсировки газогенератора был настолько значительным, что приходилось часто останавливать газогенератор для чистки горловин и гидрозатворов, что приводило к значительным простоям оборудования. Условия работы при очистке газопроводов очень тяжелые.

Потери напора воздуходувок. Полезный напор, развиваемый воздуходувками, обеспечивающими подачу дутья в газогенератор, расходовался на преодоление гидравлического сопротивле-

ния, создаваемого различными частями газогенератора. Потери напора распределяются следующим образом: в дутьевой решетке 12%; в слое золы 25%, в широкой части шахты газогенератора 37%; в швельшахте газогенератора 25%; на преодоление давления в газопроводе 1%. Из этих данных видно, что на долю суженной части газогенератора (швельшахты) и золы приходится половина гидравлического сопротивления, создаваемого газогенератором.

6. УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЕ КОНСТРУКЦИИ ГАЗОГЕНЕРАТОРОВ ДЛЯ ЩЕПЫ

Разработка рациональной конструкции газогенераторов для щепы сводилась к созданию такого агрегата, который обеспечивал бы высокую производительность в пересчете на единицу сечения шахты, а также условия, облегчающие обслуживание этого агрегата, в частности, возможность механизации процесса загрузки щепы. На рис. 33 представлен газогенератор с периодической ручной загрузкой щепы и с ручным удалением золы. Производительность газогенератора 8—9 *т/сутки* (по абс. сух. щепе), или 6—7 тыс. *пл. м³/год*. Периодическая загрузка щепы при помощи коробки обладает существенным недостатком. Однако в течение часа опытный рабочий может произвести от 10 до 15 загрузок.

Шахта газогенератора представляет собой усеченный конус с расширением вверху. Расширение сделано для того, чтобы уменьшить скорость газа, выходящего из щепы. Как показали исследования и опыт, скорость газа должна быть 0,1—0,2 *м/сек*. При этих скоростях резко сокращается унос древесной мелочи. Горловина для отбора газа из шахты расположена в крышке газогенератора.

На рис. 34 показан газогенератор с ручным выгребом золы. Загрузка щепы производится непрерывно и полностью механизирована. Слой щепы в шахте постоянный. Распределение щепы по сечению шахты производится при помощи конуса. Щепа непрерывно поступает из сушилки в загрузочную коробку. Производительность генератора 35—37 *т/сутки* (в пересчете на абс. сух. щепу), или 25 тыс. *пл. м³/год*. Газогенератор с конусным распределением топлива успешно испытан на щепе из дров. Уноса с газом древесной мелочи не наблюдалось, на что указывает отсутствие гидрозатвора на горловине газогенератора. Шуровка щепы в шахте газогенератора практически не производится, так как в этой операции почти нет необходимости. Условия эксплуатации газогенератора такой конструкции в основном удовлетворительные.

Газогенератор для лесосечных отходов изображен на рис. 35. Щепа из этого вида древесного сырья обладает весьма пониженной сыпучестью ввиду присутствия в ней веток, хвои и дру-

гой мелочи. Поэтому для распределения щепы по сечению шахты применяется разравниватель, делающий 12 *об/мин*. Слой в газогенераторе постоянный, высота его 3500 *мм*. Подача щепы производится в центр газогенератора. Выгреб золы ручной. Произ-

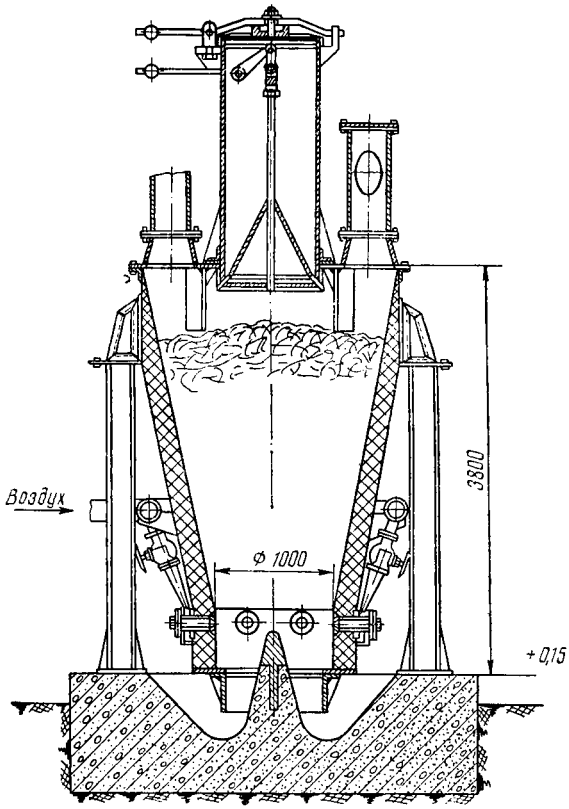


Рис. 33. Газогенератор для щепы с периферийным дутьем и периодической загрузкой топлива производительностью 8—9 *т/сутки* (по абс. сух. древесине)

водительность газогенератора 35—37 *т/сутки* по абс. сух. щепе, или 25 тыс. *пл. м*^{3}*/год*. Газогенератор испытан на щепе из лесосечных отходов, содержащих 15—25% коры и 17—30% хвои.

На рис. 36 показан механизированный газогенератор производительностью 35—37 *т/сутки* по абс. сух. щепе. Подача щепы производится при помощи шнекового затвора. Для равномерного распределения щепы по сечению газогенератора применяется разравниватель. Выгреб золы механизирован при помощи

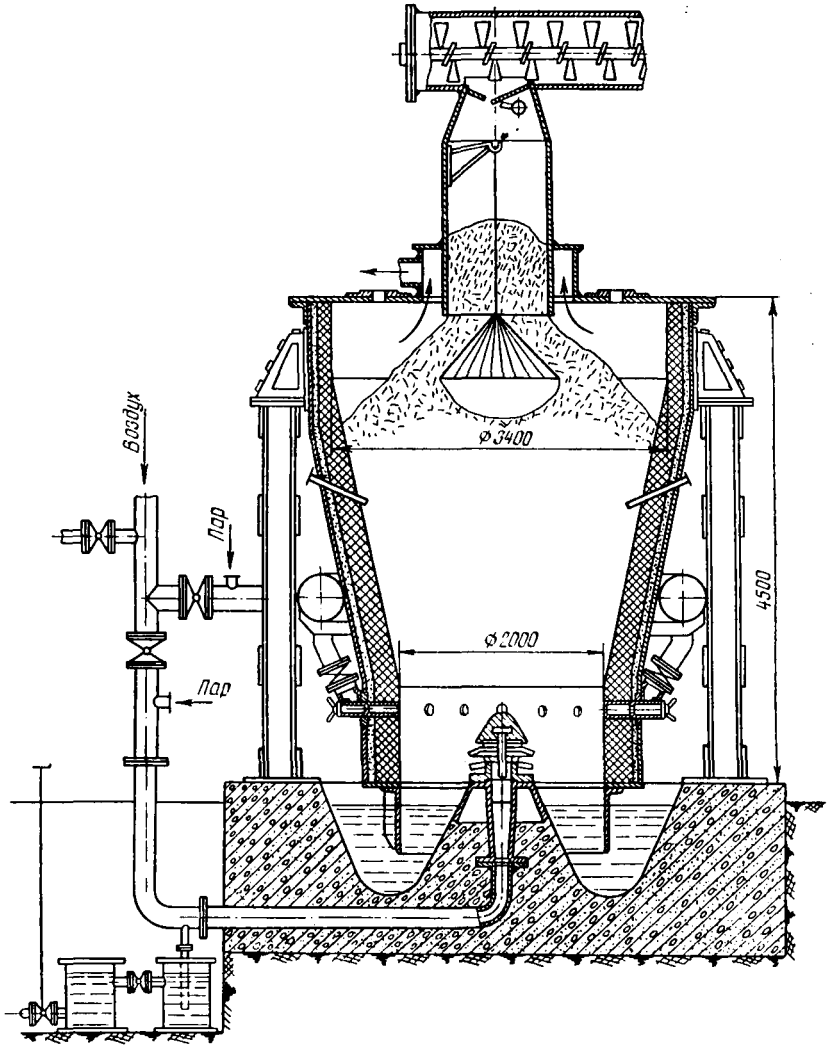


Рис. 34. Газогенератор для щепы с непрерывной загрузкой топлива производительностью 35—37 *т/сутки* (по абс. сух. древесине)

вращающейся чаши. Для измерения температуры в стенке шахты на высоте 2800 *мм* расположены четыре термопары, оказавшиеся весьма полезными при эксплуатации газогенератора.

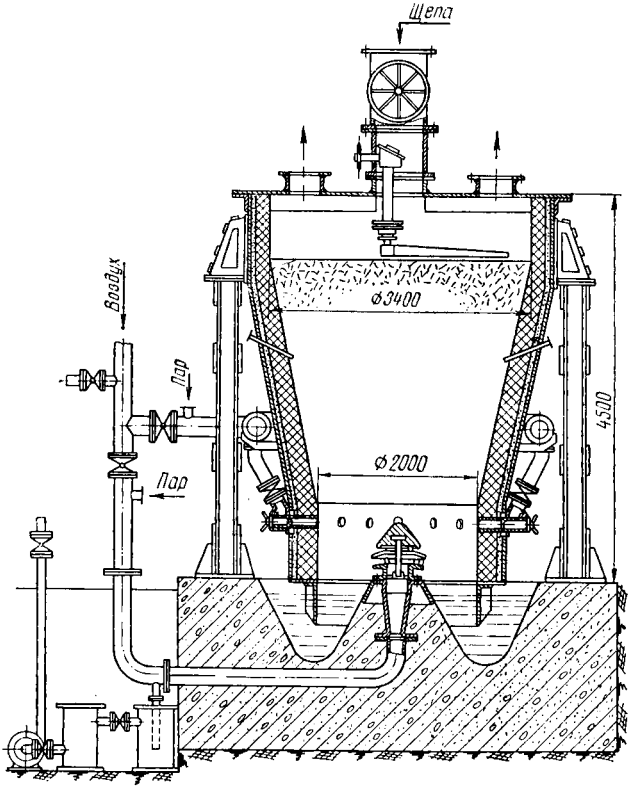


Рис. 35. Газогенератор для щепы из лесосечных отходов с механическим разравниванием топлива производительностью 35—37 *т/сутки* (по абс. сух. древесине)

Рабочий спай термопар выступает на глубину 150 *мм* от внутренней поверхности стенки. На рис. 37 представлен механизированный газогенератор производительностью 70—80 *т/сутки* по абс. сух. щепе, или 50 тыс. *пл. м*^{3}*/год.*

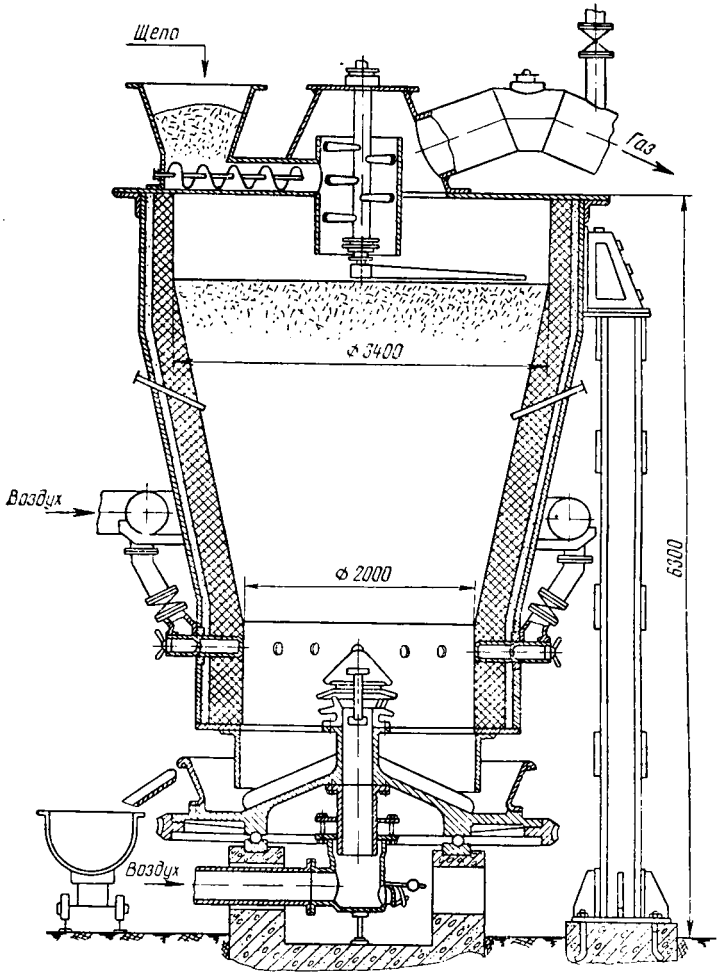


Рис. 36. Газогенератор для щепы с механизированным золоудалением при помощи вращающейся зольной чаши производительностью 35—37 *т/сутки* (по абс. сух. древесине)

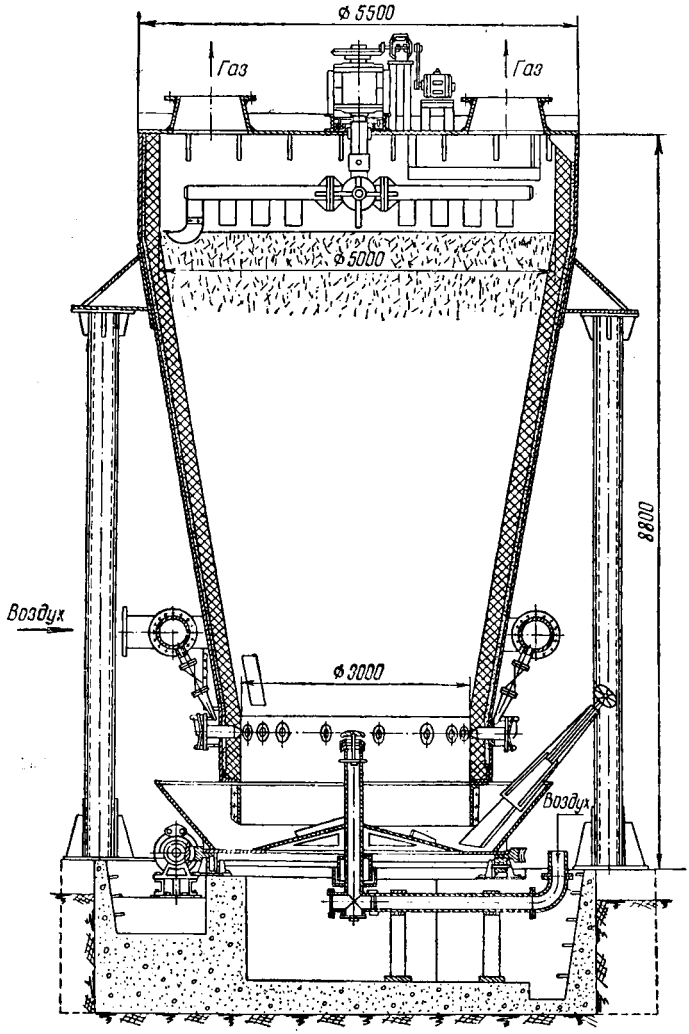


Рис. 37. Газогенератор для щепы производительностью 70—80 *т/сутки* (по абс. сух. древесине)

ГЛАВА IV

АППАРАТЫ ДЛЯ ОСАЖДЕНИЯ СМОЛЫ ИЗ ДРЕВЕСНОГЕНЕРАТОРНОГО ГАЗА

Для осаждения смолы из древесногенераторного газа применяют два типа смолоотделителей: электрофильтры и центробежные вентиляторы. Электрофильтры используют на крупных газогенераторных станциях, а центробежные аппараты — на газогенераторных установках небольшой мощности с одним-двумя газогенераторами.

Электрофильтры как смолоотделители бывают двух типов: трубчатые и пластинчатые. Центробежные типовые смолоотделители небольшой производительности по газу (1500—2000 $м^3/ч$) в СССР не выпускают. Поэтому на некоторых ГГУ в качестве центробежных смолоотделителей используют серийные кислотоупорные газодувки (ТГ-150) или центробежные вентиляторы, изготовляемые на заводах собственными силами или по чертежам отдельных институтов.

1. ЭЛЕКТРОФИЛЬТРЫ

Трубчатый электрофильтр. Этот аппарат представляет собой вертикальный футерованный металлический цилиндр, внутри которого расположены деревянные осадительные электроды в виде прямоугольных труб. Внутри по центру каждой трубы натянуты нихромовые провода диаметром 2 *мм*, служащие коронирующими электродами. Вся коронирующая система подвешена на опорных изоляторах, помещенных в изоляторной коробке с гидрозатвором, который заполнен трансформаторным маслом, защищающим эту коробку от проникновения в нее газа (рис. 38).

Газ, подлежащий обессмоливанию, входит в низ электрофильтра под хордовую насадку, равномерно распределяется по осадительным электродам и выходит через верхний штуцер.

Внутренний диаметр электрофильтра определяется числом осадительных электродов, число которых зависит от производительности аппарата. Высота электрофильтра, включая изоляторную коробку, равна 10,4 *м*; размер каждого осадительного электрода 250×250×4000 *мм* или 300×300×3800 *мм*.

Питание электрофильтра осуществляется от агрегата АФ-18, имеющего повышающий однофазный трансформатор и механический выпрямитель, автоматическое реле давления, отключающее ток при падении давления газа ниже допустимого.

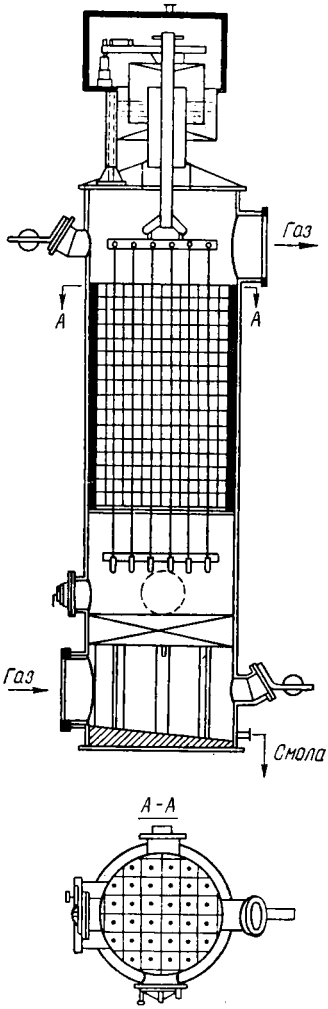


Рис. 38. Трубчатый электрофильтр с деревянными осадительными электродами

Работа электрофильтра основана на способности газа ионизироваться под действием коронного разряда, образующегося на поверхности коронирующего провода под действием тока высокого напряжения. Область ионообразования (короны) становится интенсивнее по мере увеличения электрического напряжения, подаваемого на коронирующие провода. Отрицательно заряженные частицы смолы двигаются под действием электрического поля к осадительному электроду. Частицы смолы, оседая на положительный электрод — внутреннюю стенку трубы, отдают свой заряд и становятся электронейтральными [40].

Смола и другие жидкие вещества, накапливаясь, стекают на дно электрофильтра по вертикальной стенке осадительного электрода (трубы). Для того чтобы обеспечить достаточно эффективное образование короны, внешне проявляющееся в особом жужжащем звуке и голубоватом свечении, необходимо подвести к коронирующей системе высокое напряжение (до 60—80 тыс. *в*).

Сила тока при этом бывает небольшая — около 40—80 *ма*. Общий расход электроэнергии при очистке газа электрофильтрами невелик и равен 0,5—1,0 *квт · ч* на 1000 $м^3$ газа. Удовлетворительная очистка газа от смолы наступает при удельной силе тока на 1 пог. *м* коронирующего электрода около 0,02 *ма*.

В соответствии с этим необходимо увеличивать напряжение, подаваемое на коронирующую систему, если увеличивается нагрузка электрофильтра по газу. На рис. 39 показана зависимость степени очистки газа от напряжения, подаваемого на электро-

фильтр, и его производительности. На рис .40 приведены показатели работы электрофильтра в зависимости от температуры газа.

Испытываемый электрофильтр имел 50 осадительных электродов в виде стальных труб диаметром 300 *мм*, высотой 4000 *мм*. Для достижения удовлетворительного осаждения смолы необходимо, чтобы газ находился в поле коронного разряда около 3 *сек*.

В первые годы эксплуатации ГГС с электрофильтром в качестве осадительных электродов широко применяли стальные трубы

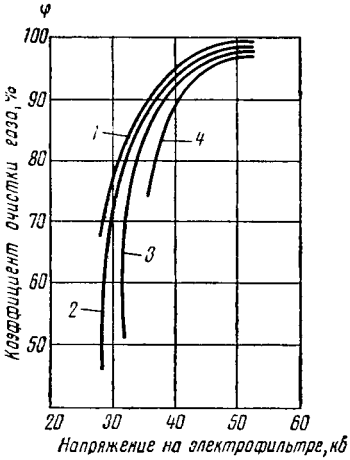


Рис. 39. Коэффициент очистки газа от смолы трубчатым электрофильтром в зависимости от производительности (по газу) и напряжения, подаваемого на коронирующую систему:

1 — производительность по газу 9000 *м³/ч*; *2* — 12 000 *м³/ч*; *3* — 15 000 *м³/ч*; *4* — по газу 18 000 *м³/ч*.

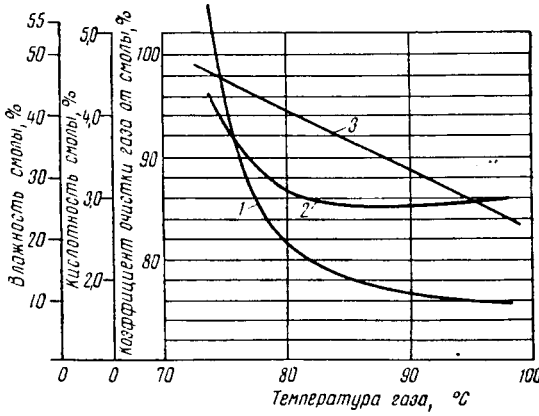


Рис. 40. Состав смолы и коэффициент очистки газа трубчатым электрофильтром в зависимости от температуры:

1 — влажность смолы; *2* — содержание летучих кислот в смоле; *3* — коэффициент очистки газа от смолы

диаметром 250 или 300 *мм* с толщиной стенки 12 *мм*. Недостатком таких электрофильтров являлся непродолжительный срок работы стальных осадительных электродов (8 месяцев). После замены стальных электродов деревянными продолжительность работы электрофильтров увеличилась в 4—5 раз [41], [42]. Деревянные осадительные электроды изготовляются из досок, укладываемых на ребро. Ширина досок 100—165 *мм*, а толщина их 15—17 *мм*. Через 2,5—3 года дерево, из которого сделаны электроды, постепенно теряет механическую прочность и осадительную насадку надо менять.

Через 3—4 месяца непрерывной работы электрофильтр останавливают для осмотра и чистки масляного затвора и профилактического ремонта. После ремонта электрофильтр продувают газом в течение 20—25 *мин*. Для безопасности в электрофильтре

во время работы поддерживается положительное давление газа (10—15 *мм* вод. ст.). Электрофильтры как смолоотделители хорошо зарекомендовали себя на одной из ГГС, работающей на щепе.

Степень осаждения смолы из древесно-генераторного газа трубчатыми электрофильтрами равна 94—96%.

Пластинчатый электрофильтр. На рис. 41 изображен электрофильтр, представляющий собой двухсекционную прямоугольную

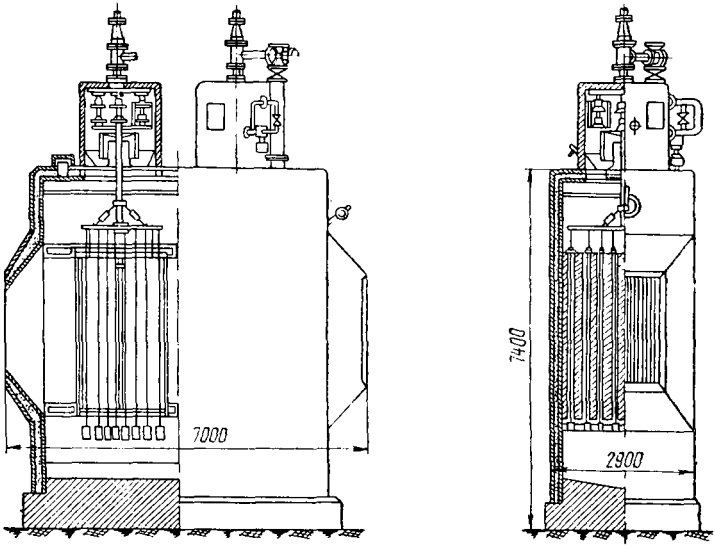


Рис. 41. Пластинчатый электрофильтр с деревянными осадительными электродами

камеру. Секции в электрофильтре расположены одна за другой, поэтому газ подвергается обессмоливанию последовательно. В каждой секции расположено по девять осадительных электродов в виде пластин размером 2100—3600 *мм*, параллельно расположенных одна от другой на расстоянии 285 *мм*. Между осадительными электродами находится стальная рама с висящими на ней коронирующими проводами, расположенными друг от друга на расстоянии 230 *мм*. Внизу к каждому коронирующему проводу подвешен груз, обеспечивающий необходимое натяжение электрода. Геометрический объем каждой секции равен 33 $м^3$, из них 15 $м^3$ занимает коронирующее поле, т. е. в электрофильтре имеется более 50% вредного пространства, что является существенным конструктивным недостатком. Часть газа может проходить по электрофильтру, минуя коронный разряд, вследствие чего степень очистки газа от смолы ухудшается. При нахождении газа в электрофильтре 6,3—7,6 *сек* коэффициент осаждения смолы достигает

90% при напряжении 60 *кв*. Повышая напряжение, подаваемое на электрофильтры, можно увеличить коэффициент очистки газа до 95%, но при этом появляются частые электрические пробои и нормальная работа электрофильтра становится невозможной [43].

Изменение очистки газа от смолы в зависимости от напряжения, подаваемого на электрофильтр, показано на рис. 42. Степень выделения смолы из газа увеличивается до 95% при снижении производительности электрофильтра по газу примерно в 2 раза.

На рис. 43 приведены данные о степени очистки газа от смолы в зависимости от производительности электрофильтра по газу, т. е. времени пребывания газа в электрофильтре. Из этого графика видно, что за первые 2 *сек* в электрофильтре выделяется примерно 65% смолы. Доочистка газа от смолы происходит менее эффективно и требует значительного увеличения времени, что приводит в конечном итоге к снижению общей производительности аппарата.

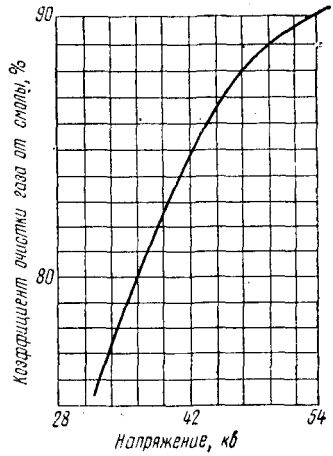


Рис. 42. Коэффициент очистки газа пластинчатым электрофильтром в зависимости от напряжения, подаваемого на коронирующую систему

Максимальный ток короны наблюдается при условии, когда газ не поступает в камеру электрофильтра. По мере увеличения подачи газа ток короны уменьшается. Чтобы увеличить ток короны при повышении производительности электрофильтра по газу, необходимо увеличивать напряжение, подаваемое на коронирующую систему, что возможно до известного предела, так как при увеличении напряжения появляются электропробои.

Оптимальное напряжение на электрофильтре и его производительность можно определить величиной тока короны в пересчете на 1 *пог. м* коронирующего провода. На рис. 44 приведены опытные данные изменения коэффициента очистки газа от смолы при температуре 74—75° в зависимости от удельного тока короны, откуда видно, что значение тока короны при достижении оптимальной очистки газа равно примерно 0,1 *ма* на 1 *пог. м* коронирующего провода. Увеличение тока короны до 0,15 *ма* существенного улучшения очистки газа не дает.

Однако увеличение тока короны (при одной и той же производительности электрофильтра по газу) не всегда допустимо из-за появления электрических пробоев. Производственные и исследовательские данные показали, что при работе пластинчатого электрофильтра при температуре газа близкой к точке росы

(74—76°), выделяется 148—145 *г/нм*³ суммарного конденсата примерно следующего состава (в %): смолы 52—55, летучих кислот (в пересчете на уксусную) 5,5—6,5, воды 38—42.

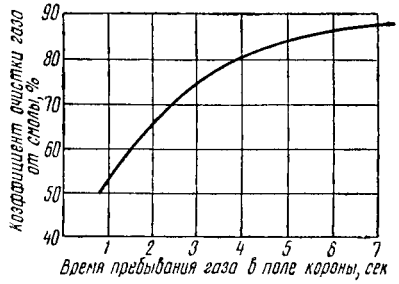


Рис. 43. Коэффициент очистки газа пластинчатым электрофильтром в зависимости от его производительности (по газу)

Выход такого конденсата по электрофильтру в пересчете на единицу газифицируемой щепы хвойных пород при влажности древесины около 40% составляет 95—110 *кг/пл. м*³. Кроме смолы, из газа осаждаются и другие продукты. На основе опыта работы можно считать, что при температурах 74—76° при помощи пластинчатых электрофильтров из древесногенераторного газа, кроме смолы, выделяется 40% летучих кислот и 12% воды. Остальное количество этих веществ (60% кислоты и 88% воды) проходит с газом через электрофильтр.

В пластинчатых электрофильтрах осадительные электроды, изготовленные из листовой стали толщиной 10 *мм*, вследствие

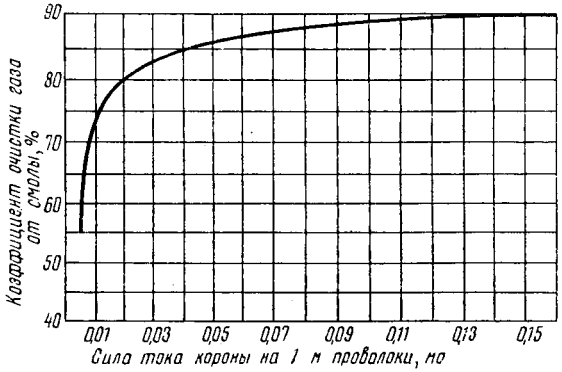


Рис. 44. Коэффициент очистки газа от смолы в зависимости от удельного тока короны

коррозии выходили из строя через 3—4 месяца. После замены этих электродов деревянными продолжительность работы осадительных электродов без замены увеличилась в 6—8 раз.

2. ЦЕНТРОБЕЖНЫЕ ГАЗОДУВКИ И ВЕНТИЛЯТОРЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В КАЧЕСТВЕ СМОЛООТДЕЛИТЕЛЕЙ

Газодувка ТГ-150-1,12. Газодувки этого типа изготовляются из хромоникелевой стали. Основная характеристика газодувки:

производительность по газу 9000 *м*³/*ч*, давление 1200 *мм* вод. ст., скорость вращения вала 2950 *об/мин*, диаметр ротора 900 *мм*, мощность двигателя 50 *квт*.

Опыт работы Верховской ГГУ показал, что степень выделения смолы из газа составляет 80—85%, а кислоты 25—30% при производительности по сухому газу 1800—2000 *нм*³/*ч* и температуре 80—90°.

Вентилятор Амзинской ГГУ. Вентиляторы этого типа разработаны Амзинским заводом и изготовлены из кислотоупорной стали собственными силами. Основная характеристика вентилятора: диаметр ротора 500 *мм*, ширина ротора 70 *мм*, скорость вращения ротора 2900 *об/мин*, максимальное давление, развиваемое вентилятором, 300 *мм* вод. ст., мощность двигателя 28 *квт*. Подшипники вентилятора размещены в коробке, охлаждаемой водой.

При температуре 70—74° и производительности по сухому газу 1200—1500 *нм*³/*ч* коэффициент очистки газа от смолы составляет 90—94%.

Вентилятор Прилукской ГГС. Вентилятор разработан ЛТА и СКБ лесной промышленности в Ленинграде. Основная характеристика вентилятора: диаметр ротора 700 *мм*, ширина ротора 150 *мм*, число лопаток 12, расположение лопаток — радиальное, скорость вращения ротора 960 *об/мин*. При температуре 60—50° и производительности по сухому газу 450—500 *нм*³/*ч* коэффициент очистки газа от смолы составляет 94—95%, мощность двигателя 7 *квт*.

Вентилятор опытного стенда ЛТА. Основная характеристика вентилятора: диаметр ротора 300 *мм*, ширина 50 *мм*, скорость вращения вала 3800 *об/мин*. При температуре газа 20—25° и производительности по сухому газу 50—70 *нм*³/*ч* коэффициент очистки газа от смолы равен 96—98%. Были испытаны четыре типа роторов (рис. 45).

В результате исследований установлено, что конструкция ротора на коэффициент очистки газа от смолы влияния не оказывает. Центробежные вентиляторы, как правило, при меньшей нагрузке по газу обеспечивают более полное смоловыделение. Создавать центробежные смолоотделители со сложным профилем лопаток нецелесообразно, так как вентиляторы-смолоотделители предназначены для осаждения смолы из газа, а потом уже для транспортирования газа. Для более полного выделения смолы (на 96—98%) на опытном стенде ЛТА количество подаваемого газа в вентилятор-смолоотделитель снижается до 20—25% максимально возможной производительности вентилятора. Уменьшение подачи газа в смолоотделитель достигается обычным дросселированием. При увеличении подачи газа в вентилятор-смолоотделитель в 2 раза, т. е. примерно до 50% максимальной производительности, коэффициент выделения смолы падает до 90%.

Многороторный смолоотделитель ЛТА. Смолоотделитель, изображенный на рис. 46, представляет собой четыре параллельно работающих ротора, установленных на одном валу. Производительность этого смолоотделителя по газу около 600 $м^3/ч$ при скорости вращения вала 2500 *об/мин*.

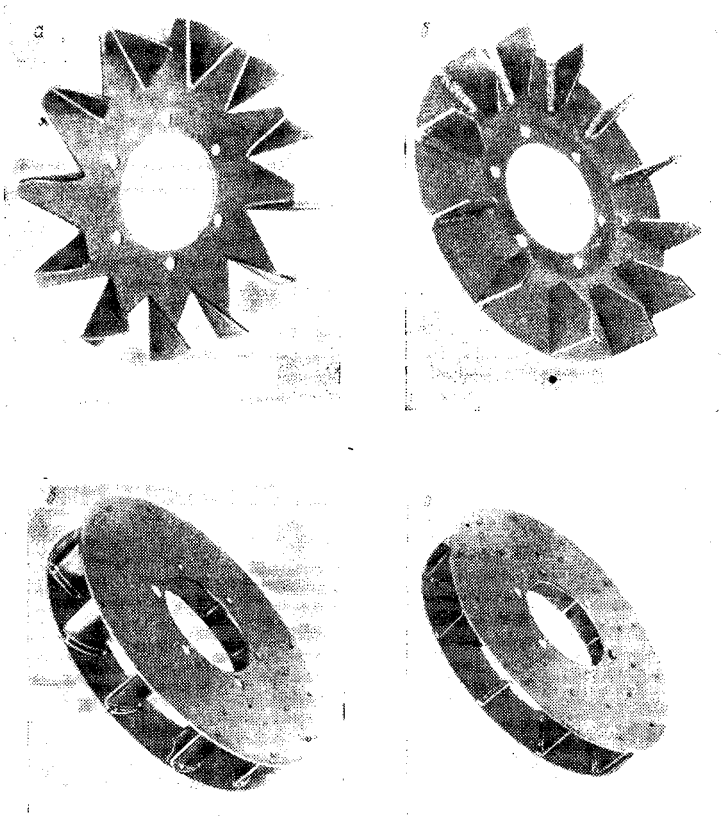


Рис. 45. Типы роторов центробежного смолоотделителя опытной газогенераторной установки ЛТА:

а и *б* — открытые роторы с радиальными лопатками; *в* — закрытый ротор с профильными лопатками; *г* — закрытый ротор с радиальными лопатками

При желании производительность смолоотделителя может быть повышена за счет увеличения числа оборотов или увеличения числа роторов, монтируемых на валу.

Кроме перечисленных центробежных вентиляторов-смолоотделителей, существует ряд других аппаратов, работающих по этому же принципу [44], [45].

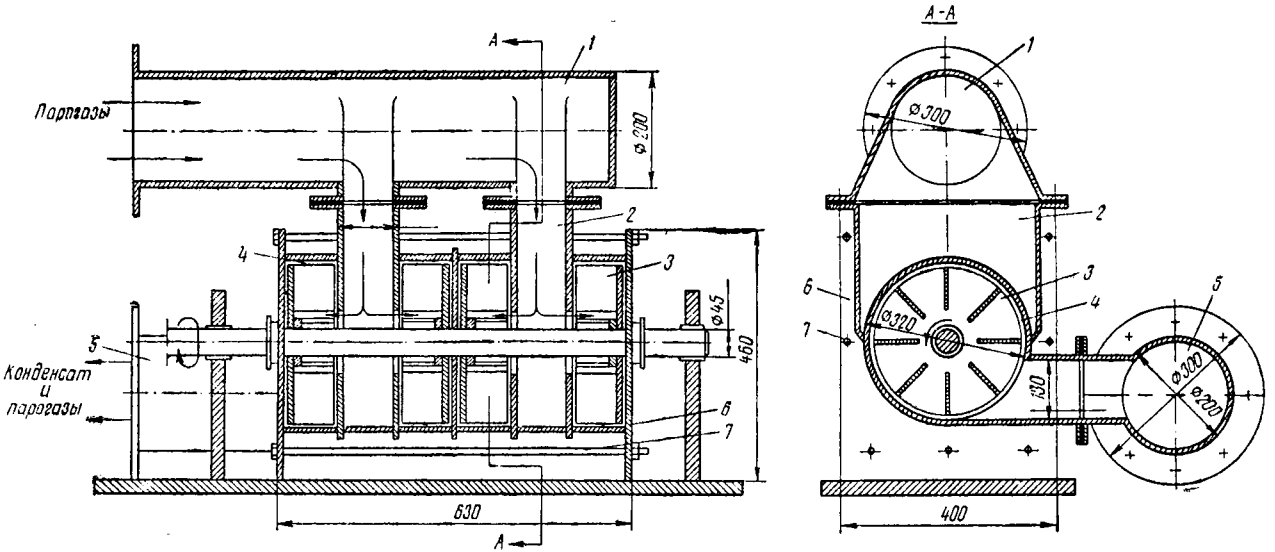


Рис. 46. Схема четырехроторного центробежного смолоотделителя:

1 — всасывающий коллектор; *2* — камера всасывания; *3* — ротор; *4* — секция смолоотделителя; *5* — коллектор нагнетания; *6* — зажимные плиты; *7* — стяжные болты

Общим недостатком центробежных смолоотделителей является их относительно низкий коэффициент очистки газа от смолы по сравнению с трубчатыми электрофильтрами. Увеличить смоловыделение центробежными смолоотделителями можно путем подачи небольшого количества смолы, жижки или воды в центр вращающегося ротора, что на ГГУ пока не производится. Количество подаваемой жидкости в ротор устанавливается опытным путем.

ГЛАВА V

ИЗВЛЕЧЕНИЕ ЖИДКИХ ПРОДУКТОВ ИЗ ДРЕВЕСНОГЕНЕРАТОРНОГО ГАЗА

1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА А. А. ДЕРЕВЯГИНА

Газ, выходящий из газогенераторов, подвергается обессмоливанию при помощи электрофильтров и затем охлаждается с одновременным извлечением уксусной кислоты.

Продукцией газогенераторной станции (ГГС) являются: генераторный газ, смола и раствор уксуснокальциевой соли.

В ЦНИЛХИ и ЛенНИЛХИ проведены большие работы, показавшие, что из древесногенераторного газа можно получить метиловый спирт и сопутствующие ему нейтральные вещества [46].

Древесногенераторный газ используют как топливо, смолу отправляют на переработку, раствор уксуснокальциевой соли упаривают, а полученный при этом древесноуксусный порошок сушат в специальной сушилке.

Кроме перечисленных продуктов, на ГГС имеются «кислые воды», содержащие летучие кислоты и смолу. «Кислая вода» образуется при отстаивании смолы, осаждаемой из газа электрофильтрами, в гидрозатворах и газопроводах, по которым газ направляется из газогенераторов в электрофильтры. Раньше «кислые воды» сбрасывались в естественные водоемы и делали воду непригодной для питья и хозяйственных нужд. Впоследствии «кислые воды» стали выпаривать с целью извлечения из них летучих кислот и водорастворимой смолы.

Производственный выход продуктов и полупродуктов в пересчете на газифицируемую древесину следующий: газогенераторного газа (в пересчете на сухой) 600 *нм*^{3}/*пл. м*^{3}; отстойной сырой смолы из электрофильтров 50 *кг/пл. м*^{3}; «кислых вод» 200 *кг/пл. м*^{3}; условного раствора древесноуксусного порошка, содержащего 7% уксуснокальциевой соли, 150 *кг/пл. м*^{3}.

Характеристика получаемых продуктов по среднегодовым данным следующая. Состав газа (в объемных %): CO_2 — 5÷7, CO — 27÷30, CH_4 — 2÷2,8, C_nH_m — 0,6÷0,7, H_2 — 14÷14,5, O_2 —

0,2÷0,25, N_2 — 46÷50. Теплота сгорания газа (низшая) 1500—1550 *ккал/нм*³. Анализ отстойной смолы: влажность 20—40%, летучих кислот (в пересчете на уксусную) 3—5%. Анализ «кислых вод»: отстой от смолы, выделенной из газа электрофильтрами (в %): растворимой смолы 15—30, летучих кислот (в пересчете на уксусную) 6—8; конденсат, выпавший из газа в газопроводах (в %): растворимой смолы 6—25, отстойной смолы 10—18, летучих кислот (в пересчете на уксусную) 3—7. Общее количество кислых вод и отстойной смолы, стекающих из газопроводов, зависит от времени года. Так, в летнее время «кислых вод» в пересчете на газ получается примерно 50—65 *г/нм*³, а зимой 70—75 *г/нм*³.

Анализ раствора древесноуксусного порошка (в %): содержание уксуснокальциевой соли 7,5—10,5, сухого остатка 10—15. Крепость древесноуксусного порошка (содержание в сухом остатке уксуснокальциевой соли) 70—73%.

По схеме процесса газ, выходящий из газогенераторов, подвергается обессмоливанию в электрофильтрах и затем поступает в солевые скрубберы, где орошается раствором древесноуксусного порошка (травленой жижкой). Нагретый раствор, содержащий свободные летучие кислоты, стекает из солевых скрубберов и поступает в сборники. Затем раствор направляется для нейтрализации летучих кислот известковым молоком и после отстоя на градирню. На градирне происходит охлаждение раствора и соответствующее концентрирование его за счет испарения воды. Из приемника градирни травления жижка подается в солевые скрубберы, где и завершается цикл ее движения. Выходящий из солевых скрубберов газ после извлечения из него летучих кислот направляется для охлаждения в оросительные скрубберы. Скрубберная вода охлаждается на другой градирне и вновь возвращается для орошения газа. При движении травленой жижки по указанному выше циклу происходит постепенное увеличение объема раствора и повышение в нем концентрации уксуснокальциевой соли. Избыток травленой жижки периодически направляется в отстойник, откуда осветленный раствор поступает на выпарку. Концентрация порошка в циркулирующей травленой жижке, скорость нарастания ее объема и степень охлаждения газа зависят от температурного режима работы солевых скрубберов и градирни.

С целью уменьшения степени извлечения из газа органических продуктов некислого характера, способствующих образованию нелетучих смол, ухудшающих качество древесноуксусного порошка, был предложен «горячий режим» извлечения из газа уксусной кислоты [47]. В этом случае травленая жижка после нейтрализации не подавалась на градирню, а без охлаждения поступала в солевые скрубберы.

На Ижевской ГГС схема очистки и охлаждения древесногенераторного газа в течение ряда лет подвергалась усовершенство-

ванию. Процессы сорбции кислоты и охлаждения газа были совмещены (рис .47).

Из резервуара *2* холодная травленая жижка насосом *3* подается в оба солевых скруббера. Из второго солевого скруббера газ выходит охлажденным. Из скрубберов стекает нагретая кислая травленая жижка и поступает в лоток *4* где производится непрерывная нейтрализация кислоты известковым молоком до слабощелочной реакции. Нейтрализованная травленая жижка

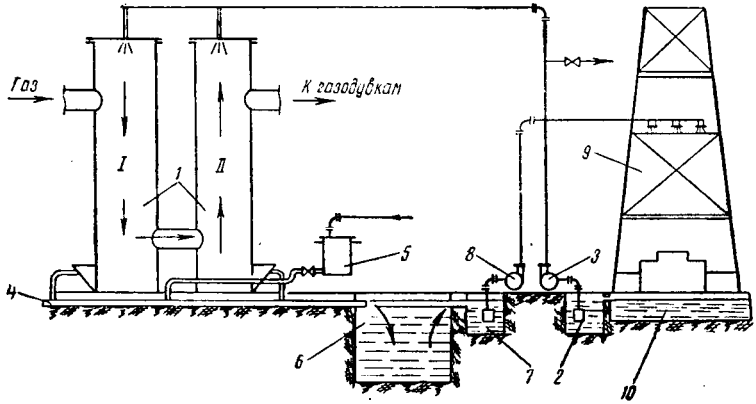


Рис. 47. Схема Ижевской газогенераторной станции для улавливания кислоты и охлаждения газа:

1 — солевые скрубберы; *2* — промежуточная емкость для травленой жижки; *3* — насос для подачи травленой жижки на скрубберы; *4* — лоток для нейтрализации жижки, стекающей из солевых скрубберов; *5* — сборник известкового молока; *6* — отстойник для нейтрализованной жижки; *7* — сборник осветленной травленой жижки; *8* — насос для подачи осветленной жижки на охлаждение; *9* — градирня для охлаждения нейтрализованной жижки; *10* — сборник охлажденной жижки

поступает в отстойник *6*. Осветленный раствор перетекает в резервуар *7* и оттуда насосом *8* подается на градирню *9* для охлаждения. Охлажденная травленая жижка из резервуара *10*, расположенного под градирней, перетекает в промежуточную емкость *2* и затем вновь подается на скрубберы.

Получающийся избыток травленой жижки периодически откачивается насосом в сборники для окончательного отстоя и последующей выпарки.

В результате работы ГГС по улучшенной схеме степень извлечения кислоты из газа в скрубберах достигла 92—94%.

2. ОПИСАНИЕ ОСНОВНОЙ АППАРАТУРЫ ДЛЯ УЛАВЛИВАНИЯ УКСУСНОЙ КИСЛОТЫ И ОХЛАЖДЕНИЯ ГАЗА

Скрубберы для сорбции кислоты и охлаждения газа состоят из стальных цилиндров, футерованных изнутри деревом. Диаметр скруббера 3,5 *м*, высота 15 *м*; в каждом из них имеется

«хордовая» насадка высотой 10,5 *м*. При работе скрубберов с этой насадкой эффективность охлаждения газа и полнота улавливания кислоты были выше, чем при работе этих же скрубберов без насадки.

Каждый скруббер оборудован 48 форсунками, установленными в три яруса: в верху скруббера 12 форсунок, в середине 24 и в низу 12. Давление травленой жижки перед форсунками 1,8—2 *атм*. Скорость подачи раствора через каждую форсунку 0,9—1,0 *л/сек*. Гидравлическое сопротивление насадки движению газа равно 20—25 *мм* вод. ст.

Насадка скрубберов постепенно забивается шламом, поэтому через 6—8 месяцев ее заменяют.

Градирня для охлаждения травленой жижки представляет собой охладительную башню, состоящую из двух частей: оросителя и вытяжной трубы. Горячая жидкость поступает на ороситель, состоящий из деревянной насадки. Навстречу стекающей жидкости снизу поступает воздух за счет тяги, создаваемой вытяжной трубой, находящейся над оросителем; при этом происходит испарение воды. Насыщенный парами воды воздух свободно выходит в атмосферу через верх градирни.

Испаряющая эффективность действия градирни, определяемая количеством тепла, израсходованным на испарение влаги, по отношению к общему количеству тепла, отнятому на градирне от охлаждаемого раствора, равна примерно 66—76%.

Для повышения степени охлаждения раствора целесообразно подавать воздух под ороситель градирни принудительно. Однако такой метод оказался громоздким, так как для этого потребовалась установка вентиляторов и герметизация в оросительной части градирни. В зимнее время, когда воздух поступает в градирню холодным, необходимо уменьшать его количество, для чего в низу градирни имеются проемы, служащие для регулирования подачи воздуха при помощи деревянных щитов. Воздух, выходящий из градирни, нагревается до 40—50°, и испаряющий коэффициент градирни зимой достигает 66—70%. Летом количество воздуха, поступающего в градирню искусственно, не уменьшают, и испаряющий коэффициент градирни повышается (75—76%). Таким образом, градирня выполняет две роли: с одной стороны, в ней охлаждается циркулирующий раствор и, с другой, — происходит концентрирование раствора за счет частичного испарения влаги.

На насадке оросителя градирни накапливается шлам, что ухудшает условия работы градирни, так как уменьшается сечение для прохода воздуха. Чистка насадки оросителя от шлама обычно производится через 6—8 месяцев.

Для циркуляции жидкости в системе скрубберов, градирни, а также аппаратов, используемых для приготовления известкового молока, применяются электродвигатели. Удельный расход

электроэнергии составляет около 3—3,2 *квт·ч* в пересчете на 1000 $м^3$ газа.

Показатели работы скрубберов и градирни следующие: расход циркулирующей травленой жижки в скруббере 9—10 *л* на 1 $м^3$ газа, нагрузка по травленой жижке на 1 $м^2$ сечения оросителя градирни 1,5—2,2 $м^3/ч$.

Температура газа перед скрубберами 68—72°, после скрубберов 37—40°. Температура травленой жижки, стекающей из скрубберов, 55—60°, охлажденной на градирне 30—35°. Степень выделения воды в скрубберах в пересчете на сухой газ характеризуется следующими данными: в газе, поступающем в скрубберы, содержится 360—380 $г/нм^3$, в газе, выходящем из скрубберов, 40—50 $г/нм^3$, воды, сконденсировано в скрубберах 320—340 $г/нм^3$.

Количество кислоты, извлекаемой из газа в скрубберах, равно 15—17 *кг* в пересчете на 1000 $м^3$ сухого газа, что составляет в пересчете на 1 *пл.* $м^3$ дров 7,5—8,5 *кг*, или 1,4—1,7% от веса абс. сух. древесины. Эти данные говорят о том, что далеко не вся кислота, образовавшаяся при термическом разложении древесины в газогенераторе, дошла с газом до солевых скрубберов. Часть кислоты выпадает из газа со смолой и кислыми водами.

Примерный баланс кислоты при прохождении газа по газопроводящей системе приводится ниже.

Распределение летучих кислот (в пересчете на уксусную) по аппаратам газогенераторной станции (в %)

Приход	
Содержание кислоты в газе при выходе из газогенератора	100
Расход	
Кислота, выпадающая из газа в газопроводах с «кислыми водами»	15
Кислота, выделяющаяся в электрофильтре:	
с осадочной смолой	10
с «кислой водой»	15
Кислота, извлекаемая из газа в солевых скрубберах	55
Кислота, уходящая с газом и поступающая в печи потребителей	5

3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА ЛТА

Для улавливания жидких продуктов из древесногенераторного газа в отличие от предыдущей схемы применяют два аппарата: охладитель газа и смолоотделитель. При этом получается кислая сырая смола (суммарный смолистый конденсат).

Эта смола является исходным сырьем для лесохимических заводов, куда её доставляют в железнодорожных цистернах. В некоторых случаях, кроме кислой смолы, на предприятии может быть организовано производство кислой обессмоленной жижки для использования ее на месте (Амзинский лесохимический завод).

Целесообразно получать суммарный смолистый конденсат на газогенераторных установках в леспромхозах и деревообрабатывающих комбинатах с последующей переработкой этого полуфабриката на существующих или вновь создаваемых смолоперерабатывающих заводах. В этом случае квалификация переработки кислой смолы на конечные продукты и экономика производства будут более благоприятны, чем для каждой отдельной ГГУ.

Получение, например, в леспромхозах только кислой смолы целесообразно еще и потому, что исключается образование сточных вод в многочисленных и мелких по масштабу производствах. Кроме того, леспромхоз освобождается от необходимости организации несвойственного ему профиля химического производства. Получение на ГГУ древесноуксусного порошка как дополнительного продукта к кислой смоле осложняет операцию выработки из древесных отходов транспортабельного лесохимического полупродукта. Для доулавливания кислоты и получения древесноуксусного порошка требуются дополнительные капитальные затраты и капиталовложения.

В схему получения кислой смолы входят следующие основные операции: частичное охлаждение газа, выходящего из газогенератора, и обессмоливание охлажденного газа. В зависимости от степени охлаждения газа получается различная по влажности кислая смола. Обессмоленный влажный газ направляется в топки. В условиях основного производства возможен перевод ряда потребителей древесного топлива на газовое отопление, например топок котлов, сушил пиломатериалов, установок хвойно-витаминной муки, шишкосушилок и др.

Выходящий из газогенератора сырой газ охлаждается путем орошения его циркулирующей жижкой, в свою очередь охлаждаемой в поверхностном холодильнике.

Возможно применение специальных газовых холодильников поверхностного типа с водяным или воздушным охлаждающим агентом. Обессмоливание газа производится при помощи сложных, но эффективных аппаратов — электрофильтров или простых центробежных смолоотделителей. Последние имеют ряд преимуществ: они безопасны в эксплуатации, могут быть изготовлены на заводе своими средствами и др.

Чем ниже температура газа перед смолоотделителем, тем полнее улавливаются из газа смолы, летучие кислоты и другие органические вещества, но при этом увеличивается влажность кислой смолы. Оптимальная степень охлаждения генераторного газа

определяется экономическими показателями для конкретных условий ГГУ.

4. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ УЛАВЛИВАНИЯ ЖИДКИХ ПРОДУКТОВ ИЗ ДРЕВЕСНОГЕНЕРАТОРНОГО ГАЗА ПО СХЕМЕ ЛТА

Древесногенераторная смола обладает свойством сорбировать из газа летучие кислоты и другие органические вещества, образующиеся в шахте газогенератора при пиролизе щепы [31]. Эта же смола по другому относится к парам воды, содержащимся в сыром газе.

Значительная часть смолы, находящаяся в мелкодисперсном состоянии, в смеси с газом представляют собой аэрозоль.

Перечисленные свойства парогазовой смеси легли в основу схемы улавливания из древесногенераторного газа смол и других органических продуктов [3].

Содержание в парах летучих кислот можно определить из уравнения Рауля—Дальтона

$$У_к = K_к \frac{P_к}{П} X_к,$$

где:

$У_к$ — относительное содержание летучих кислот (уксусной) в парах в равновесии с жидкостью, содержащей $X_к$ летучих кислот, *моль-доли*;

$P_к$ — упругость паров летучих кислот при данной температуре, *мм* рт. ст.;

$X_к$ — относительное содержание летучих кислот в жидкой фазе, *моль-доли*;

$П$ — общее давление смеси паров (например, воды, летучих кислот и др.), *мм* рт. ст.;

$K_к$ — поправочный коэффициент для летучих кислот.

Если жидкая фаза состоит из двух компонентов (воды и летучих кислот), то $K_к = 1$.

Однако содержащаяся в жидкой и газовой фазах смола по разному искажает указанную в уравнении зависимость. Значение поправочного коэффициента K как для летучих кислот, так и для воды изменяется в широких пределах. Для практической иллюстрации теоретических предпосылок, на основе которых разработана схема выделения жидких продуктов, ниже приведены результаты исследования действующих промышленных ГГУ (Амзинского завода, опытной установки ЛТА и др.).

5. ИССЛЕДОВАНИЕ КОНДЕНСАТОРА-ХОЛОДИЛЬНИКА

Конденсатор-холодильник на ГГУ предназначен для охлаждения газа перед поступлением его в смолоотделитель. Анализ суммарного конденсата и состав парогазов, выходящих из поверхностного конденсатора-холодильника, приведен в табл. 112.

Таблица 112

Состав жидкой и паровой фаз конденсатора-холодильника при различных температурах (опытные данные)

Опыты	Температура газа после конденсатора-холодильника, °С	Анализ конденсата из конденсатора-холодильника, %			Содержание капельно-жидкой и паровой фаз после конденсатора-холодильника в пересчете на сухой газ, г/нм³	Анализ капельножидкой и паровой фаз газа, выходящего из конденсатора-холодильника, %			Состав жидкой и паровой фаз, *моль-доли*				
									конденсат из конденсатора-холодильника			паровая фаза газа, выходящего из конденсатора-холодильника	
		летучие кислоты (в пересчете на уксусную)	суммарная смола (растворимая и отстойная)	„вода"		летучие кислоты (в пересчете на уксусную)	суммарная смола (растворимая и отстойная)	„вода"	летучие кислоты $X_к$	смолы $X_с$	„вода" $X_в$	летучие кислоты $Y_к$	„вода" $Y_в$
1	63	3,1	13,6	83,3	577,0	2,76	18,6	78,64	0,0110	0,0160	0,0730	0,0104	0,9896
2	62	3,4	17,1	79,5	647,0	3,28	20,5	76,22	0,0122	0,0207	0,9671	0,0126	0,9874
3	60	3,3	14,2	82,5	544,0	3,86	18,2	77,94	0,0126	0,0178	0,9696	0,0146	0,9854
4	57	1,3	7,9	90,8	577,5	1,52	9,2	89,28	0,00432	0,0087	0,98698	0,0051	0,9949
5	15	5,3	6,7	88,0	135,1	4,43	54,1	41,47	0,0180	0,0074	0,9746	0,0312	0,9688

При обработке этих данных сделаны следующие допущения:

1) в жидкой и паровой фазах под словом «вода» подразумеваются все летучие продукты (пары воды, спирта, эфиров и др.), кроме смолы и летучих кислот;

2) смола, содержащаяся в газе, выходящем из конденсатора-холодильника, находится в капельножидком состоянии, поэтому паровая фаза состоит из летучих кислот и «воды»;

3) средний молекулярный вес смолы, содержащийся в конденсате и газе, принят равным 180;

4) летучие кислоты приняты за уксусную.

Из результатов соответствующей обработки опытных данных видно, что с понижением температуры газа, выходящего из конденсатора-холодильника, поправочный коэффициент к уравнению Рауля—Дальтона для кислоты $K_к$ резко увеличивается (табл. 113). Увеличиваются значения поправочных коэффициентов и для воды $K_в$. Увеличение значения поправочных коэффициентов указывает на то, что в газе, выходящем из конденсатора-холодильника, содержание летучих кислот и воды выше теоретически возможного.

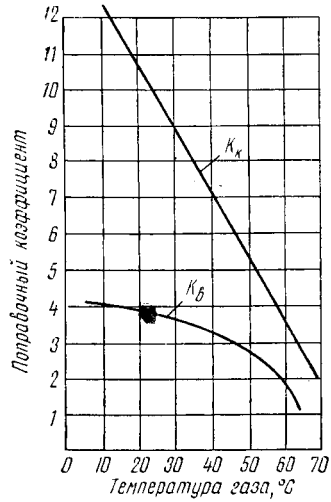


Рис. 48. Изменение поправочного коэффициента к уравнению Рауля—Дальтона для кислоты $K_к$ и воды $K_в$ в зависимости от степени охлаждения газа в конденсаторе-холодильнике

Это явление объясняется следующим. С понижением температуры газа происходит частичная конденсация паровой фазы на поверхности мельчайших частиц смолы, что приводит к их укрупнению. Поэтому наряду с наличием парообразных кислоты и воды эти вещества находятся в газе в капельно-жидком состоянии, будучи поглощены мельчайшими частицами смолы, которые с понижением температуры продолжают оставаться во взвешенном состоянии. Летучие кислоты хорошо сорбируются смолой. Поэтому значение поправочного коэффициента, особенно для кислоты, доходит до большого значения ($K_к$=11,6). Для наглядности на рис. 48 приведена зависимость значений $K_к$ и $K_в$ от степени охлаждения газа в конденсаторе-холодильнике.

6. ИССЛЕДОВАНИЕ СМОЛООТДЕЛИТЕЛЯ

Анализы жидкой и паровой фаз, выходящих из центробежного смолоотделителя при различных температурах, приведены в табл. 114.

Таблица 113

Расчет поправочного коэффициента к уравнению Рауля-Дальтона для конденсатора-холодильника

Опыты	Упругость паров при температуре опыта, *мм* рт. ст.			Равновесный (теоретический) состав паровой фазы по уравнению Рауля — Дальтона		Поправочный коэффициент к уравнению Рауля — Дальтона (см. табл. 112)	
	для чистых компонентов		летучие кислоты и „вода" в газе, выходящем из конденсатора-холодильника[1] Π	для летучих кислот $y'_к = \frac{P_к}{\Pi} X_к$	для „воды" $y'_в = \frac{P_в}{\Pi} X_в$	для летучих кислот $K_к = \frac{y_к}{y'_к}$	для „воды" $K_в = \frac{y_в}{y'_в}$
	летучие кислоты (в пересчете на уксусную) $P_к$	вода $P_в$					
1	102,3	171,4	276	0,0041	0,602	$\frac{0,0104}{0,0041} = 2,54$	$\frac{0,9896}{0,602} = 1,64$
2	95,6	164,0	291	0,0040	0,545	$\frac{0,0126}{0,004} = 3,15$	$\frac{0,9874}{0,545} = 1,08$
3	88,3	149,4	265	0,0042	0,546	$\frac{0,0146}{0,0042} = 3,48$	$\frac{0,9854}{0,546} = 1,80$
4	84,7	129,8	300	0,00122	0,426	$\frac{0,0051}{0,00122} = 4,18$	$\frac{0,9949}{0,426} = 2,33$
5	7,6	12,8	51	0,00268	0,244	$\frac{0,0312}{0,00268} = 11,6$	$\frac{0,9688}{0,244} = 3,98$

[1] На основании опытных данных (см. табл. 112).

Таблица 114

Состав жидкой и паровой фаз смолоотделителя при различных температурах (опытные данные)

Опыты	Температура газа после смолоотделителя °С	Анализ конденсата из смолоотделителя, %			Содержание капельножидкой и паровой фаз после смолоотделителя в пересчете на сухой газ, *г/нм*³	Анализ капельножидкой и паровой фаз сырого газа, выходящего из смолоотделителя, %			Состав жидкой и паровой фаз, *моль-доли*				
									конденсат из смолоотделителя			паровая фаза газа, выходящего из смолоотделителя	
		летучие кислоты (в пересчете на уксусную)	суммарная смола (растворимая и отстойная)	„вода“		летучие кислоты (в пересчете на уксусную)	суммарная смола (растворимая и отстойная)	„вода“	летучие кислоты $X_к$	смола $X_с$	„вода“ $X_в$	летучие кислоты $Y_к$	„вода“ $Y_в$
1	72	10,2	68,8	21,0	431	6,4	8,5	85,1	0,098	0,222	0,680	0,020	0,980
2	72	10,7	76,5	12,8	443	8,6	9,6	81,8	0,136	0,323	0,541	0,027	0,973
3	70	9,2	72,3	18,5	380	3,4	6,6	90,0	0,096	0,254	0,650	0,011	0,989
4	66	6,9	69,3	23,8	330	3,0	12,7	84,3	0,063	0,212	0,725	0,009	0,991
5	62	7,0	52,9	40,1	236	3,76	3,6	92,64	0,044	0,111	0,845	0,012	0,988
6	55	9,7	63,2	27,1	166	4,7	4,2	91,1	0,080	0,170	0,750	0,016	0,984
7	53	10,1	59,9	30,0	134	6,4	8,4	85,2	0,077	0,153	0,770	0,022	0,978
8	49	11,4	68,0	20,6	94	8,71	9,09	82,2	0,113	0,220	0,667	0,0308	0,9692
9	47	11,3	64,3	24,4	87	6,5	11,0	82,5	0,099	0,189	0,712	0,0230	0,9770
10	40	9,6	67,7	22,7	61	7,2	6,6	82,2	0,086	0,234	0,680	0,0244	0,9756

Таблица 115

Расчет поправочного коэффициента к уравнению Рауля-Дальтона для смолоотделителя

Опыты	Упругость паров при температуре опыта, *мм* рт. ст.			Равновесный (теоретический) состав паровой фазы по уравнению Рауля — Дальтона		Поправочный коэффициент к уравнению Рауля — Дальтона (см. табл. 114)		
	для чистых компонентов		летучие кислоты и „вода" в газе, выходящем из смолоотделителя Π (см. табл. 114).	для летучих кислот $y'_к = \frac{P_к}{\Pi} X_к$	для „воды" $y'_в = \frac{P_в}{\Pi} X_в$	для летучих кислот $K_к = \frac{y_к}{y'_к}$	для „воды" $K_в = \frac{y_в}{y'_в}$	$\frac{X_с}{X_к}$
	летучие кислоты (в пересчете на уксусную) $P_к$	вода $P_в$						
1	150	225	240	0,0570	0,660	$\frac{0,020}{0,057} = 0,35$	$\frac{0,980}{0,660} = 1,48$	2,27
2	150	255	256	0,0790	0,540	$\frac{0,027}{0,079} = 0,34$	$\frac{0,973}{0,540} = 1,80$	2,38
3	137	234	240	0,0520	0,632	$\frac{0,011}{0,052} = 0,21$	$\frac{0,989}{0,632} = 1,56$	2,65
4	120	196	218	0,0347	0,650	$\frac{0,009}{0,0347} = 0,26$	$\frac{0,991}{0,650} = 1,52$	3,36
5	98	164	168	0,0256	0,825	$\frac{0,012}{0,0256} = 0,47$	$\frac{0,988}{0,825} = 1,20$	2,52
6	74	118	126	0,0460	0,700	$\frac{0,016}{0,046} = 0,348$	$\frac{0,984}{0,700} = 1,41$	2,12
7	65	107	104	0,0490	0,790	$\frac{0,022}{0,049} = 0,450$	$\frac{0,978}{0,790} = 1,24$	2,00
8	54	88	75	0,0820	0,781	$\frac{0,0308}{0,082} = 0,378$	$\frac{0,9692}{0,781} = 1,24$	1,95
9	49	80	71	0,0690	0,801	$\frac{0,023}{0,069} = 0,334$	$\frac{0,977}{0,801} = 1,22$	1,91
10	34	55	51	0,0570	0,733	$\frac{0,0244}{0,057} = 0,430$	$\frac{0,9756}{0,733} = 1,33$	2,72
				Средние данные		0,335	1,40	2,39

Из приведенных в табл. 115 данных видно, что при изменении температуры в смолоотделителе в пределах 40—72° поправочный коэффициент к уравнению Рауля—Дальтона для летучих кислот равен в среднем 0,335, а для воды 1,40. Значение $K_к$ меньше единицы указывает на то, что осаждаемая смолоотделителем из газа смола, абсорбируя летучие кислоты, значительно сдвигает равновесие в сторону обеднения газа летучими кислотами. Значение

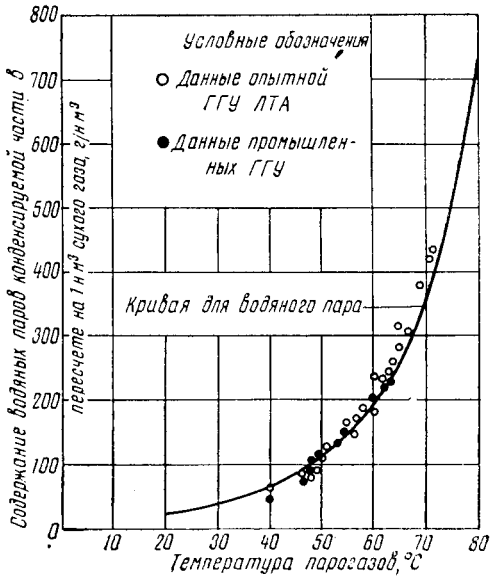


Рис. 49. Содержание конденсирующихся продуктов в газе, выходящем из смолоотделителя

$K_в$ больше единицы указывает на то, что при смоловыделении происходит обогащение газа парами воды и частичное обезвоживание кислой смолы.

Опытный материал наглядно показывает суть процессов, протекающих в газоочистной аппаратуре при работе ГГУ по схеме ЛТА.

Опыт эксплуатации промышленных газогенераторных установок подтвердил преимущество рекомендованного способа обработки парогазов.

Произведенные на основе опытов расчеты указывают на то, что с понижением температуры газа увеличивается степень улавливания летучих кислот. Соотношение между количеством смолы и летучих кислот, выраженном в *моль-долях*, которые содержатся в конденсате, осаждаемом из газа смолоотделителем, в среднем равно 2,39, или на одну весовую часть летучих кислот

в конденсате смолоотделителя в среднем приходится 6,4 весовых частей смолы. Из табл. 114 видно, что в обессмоленном газе, выходящем из смолоотделителя, при различных температурах находится примерно такое же количество конденсируемых продуктов, которое соответствует количеству паров воды при полном насыщении газа. На рис. 49 приведены данные о содержании конденсирующихся продуктов в обессмоленном газе и теоретическая кривая насыщения газа чистыми парами воды.

Из многочисленных опытов видно, что от суммы полученной смолы на долю конденсатора-холодильника приходится 16—26%, а смолоотделителя соответственно 74—84%. Соотношение между количеством растворимой и отстойной смол зависит от качества и состава газифицируемой щепы. Исследования на стенде ЛТА показали, что при охлаждении газа в пределах 40—60° суммарный коэффициент улавливания метилового спирта колебался от 40 до 60%, эфиров и других летучих органических веществ от 70 до 90%. Из всего количества выделенных из газа летучих нейтральных продуктов (метилового спирта, эфиров и др.) на долю конденсатора-холодильника приходится в среднем 46%, а на долю смолоотделителя 54%.

ГЛАВА VI

ПРОМЫШЛЕННЫЕ ГАЗОГЕНЕРАТОРНЫЕ СТАНЦИИ И УСТАНОВКИ НА ДРЕВЕСИНЕ

1. ИЖЕВСКАЯ ГАЗОГЕНЕРАТОРНАЯ СТАНЦИЯ

Ижевская ГГС построена в 1934 г. Исходным сырьем для газификации служат дрова, доставляемые главным образом по железной дороге широкой колеи. Размер дров по длине 2—2,2 *м* при максимально допустимом диаметре 500 *мм*. Склад сырья снабжен бревнотасками, при помощи которых древесина подается в рубильные машины производительностью 60—70 *скл.м*^{3}/*ч* каждая.

Размер щепы можно регулировать в пределах 25—100 *мм* путем соответствующей постановки ножей. Смена ножей производится через 4 *ч* работы машины.

Щепа выбрасывается в циклон, а оттуда ссыпается на горизонтальный транспортер и автоматически перегружается на наклонный. Наклонным транспортером щепа подается в газогенераторное отделение на высоту 22 *м*, где она при помощи горизонтальных транспортеров и передвижной разгрузочной тележки распределяется по бункерам, расположенным над газогенераторами. Бункеры железобетонные, но нижняя часть каждого из них заканчивается двумя небольшими бункерами, изготовленными из листовой стали толщиной 8 *мм*. Емкость каждого железобетонного бункера 500 *м*^{3}. Щепа из стального бункера поступает в соответствующий газогенератор через специальный питатель.

Кроме щепы, получаемой из дров, газогенераторная станция использует измельченные лесосечные отходы, доставляемые из леспромхозов в железнодорожных вагонах.

Расход электроэнергии для топливоприготовления и подачи при непрерывной загрузке в рубильную машину 45 *пл. м*^{3}/*ч* дров приведен в табл. 116.

Проектная производительность каждого газогенератора по щепе влажностью 25% составляет 60 *т/сутки*, что в переводе на дрова равняется 30 тыс. *пл. м*^{3}/*год*.

Таблица 116

Расход электроэнергии для измельчения дров и транспортировки щепы

Оборудование	Установочная мощность электродвигателя, *квт*	Мощность при рабочей нагрузке, *квт*	Расход электроэнергии на 1 *пл. м*³ дров	
			квт·ч	%
Бревнотаска	29	13,6	0,32	12
Рубильная машина	150	86,0	2,00	73
Горизонтальный транспортер	6,3	3,5	0,08	3
Наклонный транспортер	14	8,6	0,20	7
Питатель газогенератора	6,8	6,0	0,14	5
Итого	206,1	117,7	2,74	100

Шахта газогенератора футерована огнеупорным кирпичом. Удаление золы механизировано при помощи чаши, вращающейся со скоростью от 0.3 до 1 *об/ч*, приводимой в движение через специальную трансмиссию от редуктора и электродвигателя мощностью 9,3 *квт* (один редуктор для шести газогенераторов). Дутье осуществляется от воздуходувок высокого давления. Для увлажнения воздуха, подаваемого в газогенератор, используется пар от заводской котельной. Температура паровоздушного дутья регулируется в пределах 45—60°. Газ из газогенератора по горловине диаметром 750 *мм* поступает в кольцевой коллектор диаметром 1500 *мм*, расположенный вдоль наружных стен здания, в котором установлены газогенераторы. Присоединение или отключение каждого газогенератора производится через специальный гидрозатвор.

Из кольцевого коллектора газ поступает в газовый коллектор, размещенный перед электрофильтрами. После электроочистки газ, пройдя два коллектора, направляется в скрубберы для извлечения уксусной кислоты и охлаждения (рис. 50).

Станция оборудована газогенераторами с суженной швельшахтой (см. рис. 30). Газогенераторы расположены в помещении в два ряда. Часть электрофильтров установлена в помещении, а часть вне здания. Солевые и промывные скрубберы находятся па открытой площадке. Газ нагнетается кислотоупорными газодувками потребителю по газопроводу, не имеющему футеровки. Газопроводы на участке газогенератор-газодувки, а также электрофильтры и скрубберы футерованы досками по битуму и кошме.

Газогенераторную станцию останавливают 2 раза в год для чистки газопровода, по которому очищенный газ подается потребителю. На внутренней поверхности стенки этого газопровода по-

степенно накапливается смоляной слой, напоминающий собой губку и являющийся продуктом вторичного происхождения.

Учет газифицируемой древесины производится коробками по количеству загрузок. Геометрический объем загрузочной коробки 1,72 *м*³, а полезный объем по щепе 1,64 *нас. м*³. Выход щепы с 1 *пл. м*³ дров равен 2,9 *нас. м*³.

Количество абс. сух. еловой древесины в 2-метровых дровах влажностью 35% составляет 375 *кг/пл. м*³.

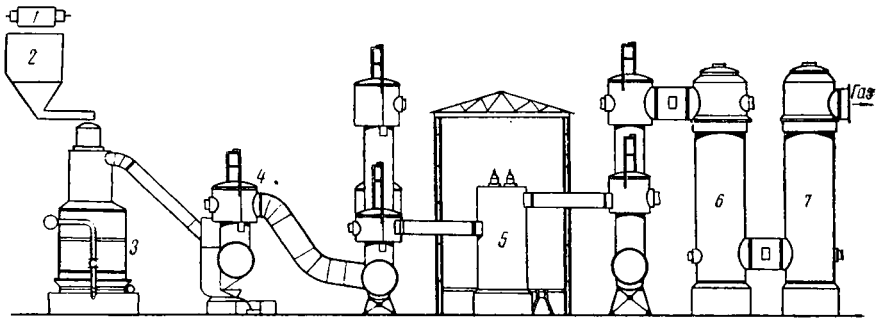


Рис. 50. Схема технологического процесса Ижевской ГГС:
1 — транспортер для щепы; *2* — бункер для щепы; *3* — газогенератор; *4* — гидрозатвор; *5* — электрофильтр; *6* — солевой скруббер; *7* — промывной скруббер

Из табл. 117 видно, что в газе выходящем из газогенератора, с повышением влажности щепы содержание смолы и летучих кислот заметно падает.

Влагосодержание газа почти не изменяется. Это постоянство влагосодержания газа наблюдается при изменении влажности щепы в пределах 30—40%.

Таблица 117

Состав конденсируемой части газа в зависимости от влажности щепы

Относительная влажность щепы, загружаемой в газогенератор, %	Содержание в пересчете на сухой газ, *г/нм*³		
	суммарная смола	летучие кислоты (в пересчете на уксусную)	вода
32	89,3	16,4	528
33	81,9	15,7	533
34	72,3	14,6	507
38	73,2	11,7	500
42	59,2	10,1	517

Примечание. Состав газифицируемой древесины: ели 90% и березы 10%.

При увеличении влажности щепы удельный выход газа увеличивается, а выход реакционной воды снижается. Оба этих фактора в конечном итоге обеспечивают стабильность влагосодержания газа при газификации щепы в пределах указанной влажности.

На Ижевской ГГС организовано получение древесноуксусного порошка (см. рис. 47).

Количество летучих кислот в газе, выходящем из газогенератора, определяет содержание кислоты перед скрубберами, в которых она улавливается.

Из табл. 118 видно, что имеется тенденция к уменьшению потерь кислоты при увеличении первоначального содержания ее в горловине газогенератора.

Таблица 118

Содержание летучих кислот в различных точках технологической схемы ГГС (в пересчете на сухой газ)

В горловине газогенератора, *г/нм*³	Перед скрубберами, *г/нм*³	Потери при прохождении газа через электрофильтр и по газопроводам, *г/нм*³	Количество летучих кислот перед скрубберами от содержания их в горловинах газогенераторов, %
16,4	12,0	4,4	73
15,7	9,7	6,0	62
14,6	9,2	5,4	63
11,7	6,0	5,7	51
10,1	5,7	4,4	56

Влияние производительности газогенераторов на выход жидких продуктов и газа показано в табл. 119. Влажность щепы 43,5%. Порода древесины — ель. Средний размер щепы 80 *мм*. Температура паровоздушной смеси 45°.

При постоянном слое топлива в газогенераторе 5,6 *м* с увеличением производительности газогенератора снижается выход смолы и кислоты при одновременном увеличении удельного выхода газа, так как время пребывания щепы в зоне сушки и швелевания с увеличением производительности газогенератора резко сокращается.

Из табл. 120 видно, что при газификации щепы влажностью 38—42%, но при различном слое (2600 и 5600 *мм*) выход газа и кислот практически не изменился.

Наблюдающееся уменьшение выхода смолы объясняется вредным влиянием фильтрующего свойства излишнего слоя щепы. В этом случае на поверхности щепы частично оседает смола, которая при швелевании щепы полностью не отгоняется, а остается в виде пека и кокса на поверхности древесины [21].

Средний состав газа за несколько лет работы станции на щепе характеризуется следующими данными (в объемных %): CO_2 —

Таблица 119

Выход газа и жидких продуктов в зависимости от производительности газогенератора

Показатели	Опыты			
	1	2	3	4
Производительность газогенератора в пересчете на абс. сух. щепу, *кг/ч*	2710	2060	1410	785
Интенсивность газификации щепы (по абс. сух. древесине), *кг/м²·ч*	440	330	230	130
Температура газа в горловине газогенератора, °С	78	78	82	82
Выход газа в пересчете на абс. сух. щепу, *нм³/кг*	1,94	1,88	1,87	1,84
Выход от веса абс. сух. щепы (в %):				
смолы	8,15	9,91	10,8	11,0
летучих кислот (в пересчете на уксусную)	1,63	2,13	2,26	3,10
Слой щепы в газогенераторе, *мм*	3520	3450	4000	4250
Раскаленный слой угля в газогенераторе, *мм*	1900	1800	1300	1100
Слой шлака в газогенераторе, *мм*	480	350	300	250
Объем щепы в зоне сушки и швелевания, *нас. м³*	14,3	15,2	18,8	20,4
Время пребывания щепы в зоне сушки и швелевания щепы, *мин*	50	70	120	240

Таблица 120

Влияние высоты слоя щепы в газогенераторе на выход газа и жидких продуктов

Показатели	Газификация щепы	
	с высоким слоем щепы	с низким слоем щепы
Высота слоя топлива в газогенераторе над уровнем подачи дутья, *мм*	5600	2600
Относительная влажность щепы, %	38	40
Средний размер щепы, *мм*	62	60
Интенсивность газификации щепы в пересчете на абс. сух. древесину, *кг/м²·ч*	245	256
Температура дутья, °С	40	45
Температура газа в горловине газогенератора, °С	78	90
Выход газа в пересчете на абс. сух. газ, *нм³/кг*	1,83	1,8
Выход жидких продуктов от веса абс. сух. щепы, %:		
смолы	10,3	11,5
летучих кислот (в пересчете на уксусную)	2,50	2,52

$5 \div 7$; CO—$27 \div 30$; CH_4 — $2 \div 2{,}8$; C_nH_m — $0{,}6 \div 0{,}7$; H_2 — $14 \div 14{,}5$; O_2 — $0{,}2 \div 0{,}25$; N_2 — $46 \div 50$. Теплота сгорания газа (низшая) в пересчете на сухой 1500—1550 *ккал/нм*^{3}.

С повышением влажности щепы выход жидких продуктов уменьшается, а выход газа растет. Суммарный к. п. д. газогенератора по газу и жидким продуктам остается в пределах 81—82%. Это явление ставит газификацию сырого измельченного топлива в преимущественное положение перед газификацией крупного древесного топлива (например, древесины в виде поленьев). При газификации сырых дров суммарный к. п. д. падает.

Исследования газогенераторов Ижевской ГГС показали, что значительное количество влаги газа находится в капельно-жидком состоянии. Так, при изменении влажности газифицируемой щепы в пределах 40—48% количество капельножидкой воды в пересчете на абс. сух. древесину колеблется от 16 до 27%, т. е. щепа газифицируется как бы с постоянной относительной влажностью (35%) независимо от того, с какой влажностью она поступает в газогенератор. Соответственно этой влажности затрачивается нужное количество тепла на испарение влаги. Остальная влага топлива выносится из газогенератора в виде туманообразных частиц без затрат тепла на испарение. Следовательно, можно считать, что количество кислых вод, выпадающих при прохождении газа по газопроводам ГГС, будет определяться в известной мере не только законом теплообмена, но и законом, определяющим скорость осаждения мельчайших частиц на внутреннюю поверхность газопровода (закон Стокса).

При определении влияния различных факторов на количество выпадающих кислых вод из газопроводов Ижевской ГГС были получены данные, подтверждающие сделанный вывод:

1. При различных температурах окружающей среды (при изменении температуры на улице летом от 8 до 19° и зимой от —5 до —23°) количество кислых вод, стекающих из газопроводов, практически не изменялось.

2. Увеличение количества газа, проходящего по газопроводу, сопровождалось почти пропорциональным увеличением количества кислой воды, стекающей из газопроводов.

3. Изменение разности температур между температурой газа и окружающей среды оказывало влияние на количество кислых вод только в том случае, когда разность температур была вызвана изменением температуры газа внутри газопровода, а не окружающей среды.

Температура газа, проходящего по газопроводу, оказывала также влияние на количество и размер туманообразных жидких частиц. При понижении температуры газа количество туманообразных частиц увеличивалось, а следовательно, увеличивалось и количество стекающей кислой воды, что показали специальные исследования.

Как уже было сказано, изменение влажности сырой щепы в пределах 10% почти не влияет на влагосодержание газа. Кроме того, часть влаги находится в газе в капельно-жидком состоянии. На основании этих исследований было предложено возвращать в газогенератор неиспользуемые смолистые кислые воды, чтобы не отравлять общественные водоемы наиболее вредными сточными водами. Для этого щепа перед загрузкой в газогенератор смачивалась кислой водой.

Особенно успешно осуществлялось это мероприятие на кислых водах, содержащих повышенное количество растворимой смолы. Присадку кислой воды к щепе, загружаемой в газогенератор, можно производить в количестве 75—100 *г/кг* и более (в пересчете на абс. сух. древесину).

Чтобы установить влияние степени влажности дутья на ряд показателей при работе промышленного газогенератора на сырой щепе, были проведены опыты газификации щепы при различном паровоздушном дутье. Исследование газогенераторного процесса производилось на генераторе, изображенном на рис. 31.

При исследовании производили анализ газа, выходящего из газогенератора, и газа, образующегося в зоне на уровне фурм периферийного дутья. В последнем случае трубку для отбора газа, охлаждаемую водой, вставляли в раскаленный слой угля через различные фурмы на глубину 400 *мм*, считая от внутренней поверхности стенки газогенератора. Определяли содержание конденсируемой части в газе, выходящем из горловины газогенератора, содержание паров воды в воздухе, поступающем в газогенератор, и в газе у фурм периферийного дутья [48].

Высоту раскаленной зоны замеряли при помощи выемных тонких стальных штанг.

Температуру паровоздушной смеси регулировали по ртутному термометру, установленному в воздухопроводе в непосредственной близости от газогенератора.

В раскаленной зоне газогенератора, у фурм периферийного дутья температуру замеряли при помощи платиновых термопар. В этих же точках отбирали пробу газа для его анализа.

Учет израсходованного топлива производили по количеству загрузок щепы.

Контрольный вес щепы в объеме загрузочной коробки определяли до начала опыта. В результате этих замеров было установлено, что в одной загрузочной коробке при средней относительной влажности щепы 45% находится 234 *кг* абс. сух. древесины.

Количество древесной мелочи (уноса), выносимой потоком газа из газогенератора в гидрозатвор, составляло примерно 0,4%, поэтому потери во время опыта не учитывались.

Относительная влажность газифицируемой щепы была 42—43%, а средневзвешенный размер ее 60 *мм*.

Соблюдая режим золоудаления, шуровки топлива в шахте, чистки дутьевых форм, а также бесперебойную подачу щепы, получали практически постоянную производительность газогенератора, которая колебалась в пределах 91,2—95,1 *т/сутки* в пересчете на абс. сух. древесину. Интенсивность газификации на уровне фурм в пересчете на сухую щепу составляла 600—700 *кг/м²·ч*.

Температура газа в горловине газогенератора при различной влажности дутья была почти постоянной (78—79°).

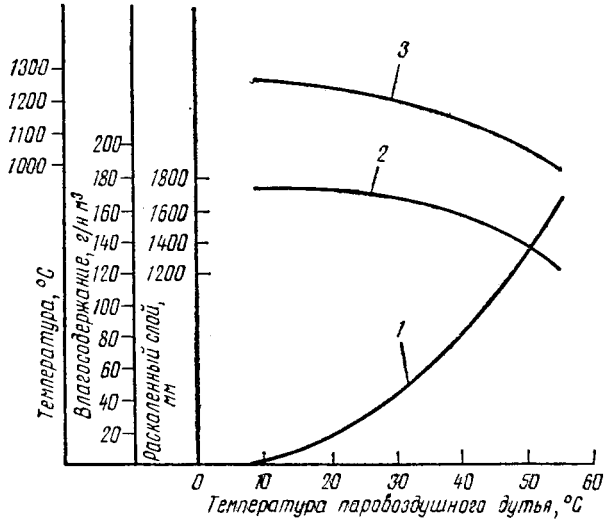


Рис. 51. Температура и высота раскаленной зоны газогенератора в зависимости от температуры паровоздушной смеси:

1 — влагосодержание дутья; *2* — высота раскаленного слоя; *3* — температура в зоне подачи дутья

Из рис. 51 видно, что с повышением температуры, т. е. влагосодержания дутья, высота раскаленного слоя и его температура уменьшились. Так, при сухом дутье температура в раскаленной зоне равнялась 1227°, а при паровоздушном дутье (55°) температура слоя падала до 940°. Высота раскаленного слоя топлива в газогенераторе соответственно уменьшалась с 1750 до 1260 *мм*.

По опытным данным содержание влаги в дутье было завышено в среднем на 20% по сравнению с теоретически возможным. Очевидно, воздух, поступающий в газогенератор, перенасыщается влагой за счет содержания в нем мельчайших капелек воды.

В газе, выходящем из горловины газогенератора, с повышением влагосодержания дутья заметно увеличивается содержание

CO_2 и H_2 и одновременно снижается количество CO и N_2 (рис. 52).

Судя по составу, теплота сгорания газа (высшая) почти не изменилась и составляла в среднем 1670 *ккал/нм*³.

Состав конденсируемой части газа, выходящего из газогенератора, в зависимости от температуры паровоздушного дутья (влагосодержания) изменялся несущественно. Наблюдалась тенденция к уменьшению содержания в газе смолы при одновременном увеличении количества кислоты и спирта (табл. 121).

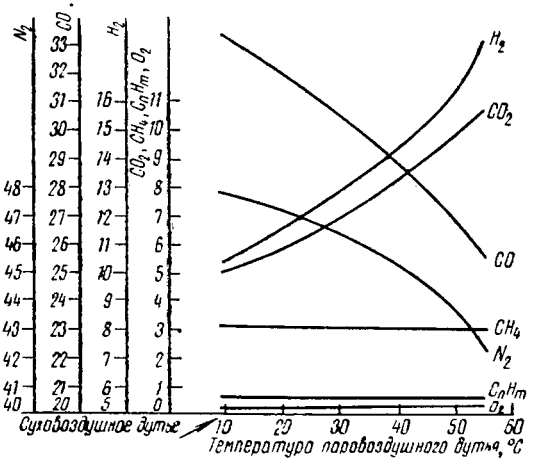


Рис. 52. Состав газа в горловине газогенератора в зависимости от температуры паровоздушного дутья

Влагосодержание газа раскаленной зоны заметно изменялось и при температуре дутья 55° достигало 38,5 *г/нм*³.

Таблица 121

Содержание конденсируемых продуктов в газе горловины и раскаленной зоны газогенератора в зависимости от температуры паровоздушного дутья

Место отбора пробы газа	Вещества, содержащиеся в газе	Содержание продуктов, *г/нм*³, при температуре дутья, °C					
		9	20	35	45	50	55
Горловина газогенератора	Суммарная смола	65,0	65,2	62,8	61,1	58,1	55,8
	Летучие кислоты (в пересчете на уксусную)	6,8	7,4	7,6	7,3	8,5	8,8
	Древесный спирт	2,6	2,0	3,0	3,3	3,2	3,3
	Вода	499	535	506	508	500	520
Раскаленная зона газогенератора	Вода	Нет	1,8	9,3	21,2	28,6	38,5

В средней пробе щепы содержалось (в %): углерода 49,5; водорода 6,26; кислорода 43,5; золы 0,74, а в средней пробе суммарной газогенераторной смолы содержалось: углерода 72; водорода 7 и кислорода 21.

Из табл. 122 видно, что с увеличением влагосодержания дутья повышался выход газа.

Суммарный выход органических жидких продуктов в пересчете на абс. сух. древесину мало изменялся. Однако выход смолы снижался незначительно, а выходы кислот и спирта заметно росли.

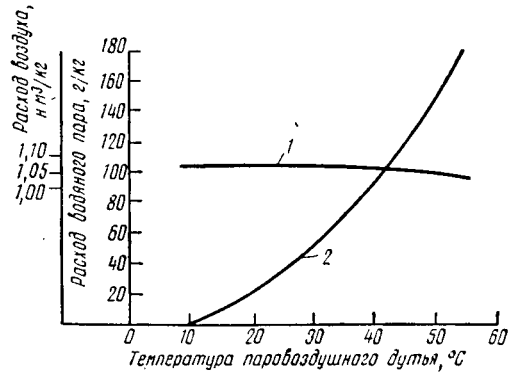


Рис. 53. Расход воздуха и пара в пересчете на абс. сух. щепу в зависимости от температуры паровоздушного дутья:
1 — расход воздуха; *2* — расход пара

Под словом «вода» подразумевается: вода разложения древесины плюс вода дутья, прошедшая через раскаленную зону.

Удельный расход воздуха с повышением температуры паровоздушного дутья должен уменьшаться, так как часть древесного кокса расходуется при взаимодействии его с возрастающим количеством водяного пара (рис. 53).

Данные материальных балансов (расчет их не приводится) показали, что при газификации сырой щепы влажностью 42—43% на паровоздушном дутье при температуре 9—55° в газ и жидкие органические продукты практически переходило одинаковое количество углерода древесины. Так, во всех опытах углерода перешло в газ в среднем 40,5% от веса древесины, или 82% от всего углерода, поступившего в шахту газогенератора со щепой.

Такая же картина наблюдалась и с другими составляющими древесины. Так, водорода перешло в жидкие органические продукты в среднем 0,95% от веса абс. сух. древесины, что составляет 15,2% от всего водорода, содержащегося в абс. сух. древесине; кислорода перешло в жидкие органические продукты соот-

Таблица 122

Выход газа и жидких продуктов газификации щепы в зависимости от температуры паровоздушного дутья

Продукты	Выход продуктов при температуре дутья, °С					
	9	20	35	45	50	55
Газ от веса абс. сух. древесины, *нм³/кг*	1,78	1,80	1,83	1,86	1,89	1,92
Жидкие продукты, %:						
суммарная смола	11,50	11,70	11,50	11,40	11,0	10,70
летучие кислоты (в пересчете на уксусную)	1,21	1,33	1,39	1,36	1,61	1,69
древесный спирт	0,46	0,52	0,55	0,61	0,60	0,63
вода	18,60	18,90	20,60	21,00	22,40	24,30

ветственно 3,42 и 7,8%. Общий суммарный выход органических продуктов пиролиза древесины не зависел от влагосодержания дутья и составлял в среднем 13,3% от веса абс. сух. щепы.

Удельный расход воздуха с увеличением влажности дутья уменьшался от 137,6 до 131,8 *кг* в пересчете на 100 *кг* абс. сух. древесины, одновременно расход водяного пара в последнем опыте достигает 17,4 *кг*. При сравнении данных для опыта с температурой дутья 20—55° установлено, что расход воздушного дутья уменьшался на 4,23%, а расход водяного пара увеличивался почти на 40%.

Объясняется это тем, что не весь водяной пар дутья реагировал с углеродом кокса. Основная масса водяного пара взаимодействовала с окисью углерода по реакции водяного газа $CO + H_2O \rightleftarrows CO_2 + H_2$. Поэтому уменьшение расхода воздушного дутья не соответствовало резко возраставшему расходу пара. В пересчете на абс. сух. щепу количество реакционной воды и неразложившейся воды дутья по мере увеличения температуры паровоздушной смеси повышалось от 18,6 до 24,3%. Эти данные указывали на то, что не вся влага дутья разлагается в зоне собственно газификации.

Выход газа (по весу) в пересчете на абс. сух. древесину увеличивался в последнем опыте на 3% по сравнению с контрольным. Между тем, расход пара в последнем опыте на 100 *кг* абс. сух. щепы составлял 17,4 *кг*. Отсюда следует, что применять дорогостоящий пар для охлаждения раскаленной зоны газогенераторов при газификации щепы вряд ли будет экономически выгодно. По опыту газогенераторных установок, работающих на других топливах, надо использовать отработавший пар или производить увлажнение дутья теплой циркуляционной водой, нагреваемой за счет физического тепла генераторного газа, пароводяной рубашки или других устройств.

На рис. 54 приведен состав газа, получающегося в раскаленной зоне на уровне дутьевых фурм периферийного дутья.

В среднем выход швельгаза в пересчете на абс. сух. древесину оказался равным 0,493 *нм*³/*кг*, состав его был следующий (в объемных %): CO_2 — 18,3; CO — 30,2; CH_4 — 10,8; C_nH_m — 1,9; H_2 — 38,8.

Из рис. 55 видно, что выход газа, образующегося в газогенераторе на уровне фурм периферийного дутья, с увеличением влагосодержания дутья постепенно растет. Этим и объясняется общее увеличение выхода газа при повышении температуры паровоздушного дутья.

Теплота сгорания газа, выходящего из горловины газогенератора, практически постоянна. То же самое можно сказать о газе, получаемом в зоне на уровне фурм периферийного дутья. Повышение к. п. д. газогенератора по газу при увеличении влагосодержания дутья происходит, видимо, за счет газа, образующегося в раскаленной зоне газогенератора.

При газификации щепы на сухом и паровоздушном дутье в газ и жидкие продукты переходило 81—82% потенциального тепла древесины.

Для увлажнения дутья использовался водяной пар от котельной завода, поэтому в приходные статьи теплового баланса вошло полное теплосодержание дутья. Если бы увлажнение дутья производилось за счет использования отработавшего тепла (например, физического тепла сырого газа), то к. п. д. газогенератора по газу и жидким продуктам несколько возрастал бы и процесс газификации при паровоздушном дутье оказался бы более выгодным.

Из данных табл. 123 видно, что с повышением влагосодержания дутья степень разложения водяных паров падала до 70%. Однако абсолютное количество прореагировавшего водяного пара с увеличением температуры паровоздушного дутья повышалось и достигало 121 *г*/*кг* в пересчете на абс. сух. древесину.

Количество реакционной воды, образовавшейся при газификации сырой щепы, во всех опытах оказалось практически одинаковым и в среднем равнялось 18,7%, считая от веса абс. сух. древесины.

На рис. 56 приведен состав газа в раскаленной зоне газогенератора, а также константа равновесия $K_p = \frac{CO \cdot H_2O}{CO_2 \cdot H_2}$. Значение константы равновесия в зависимости от температуры выражается уравнением

$$\lg K_p = \frac{-2189}{T} - 0{,}2015 \lg T - 0{,}000394T + 0{,}547 \cdot 10^{-7}T^2 + C.$$

В табл. 124 приведены значения константы интегрирования C, вычисленные для каждого опыта. В среднем опытная константа

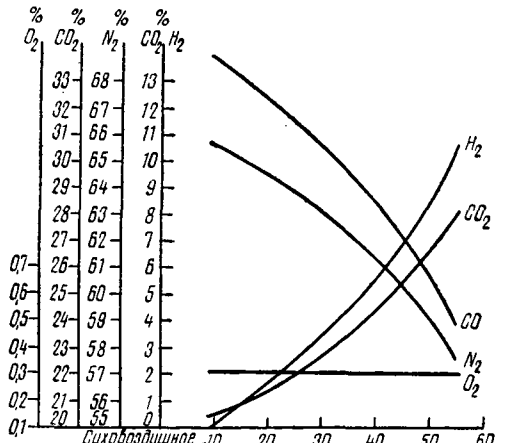


Рис. 54. Состав газа на уровне фурм периферийного дутья в зависимости от температуры паровоздушной смеси, подаваемой в газогенератор

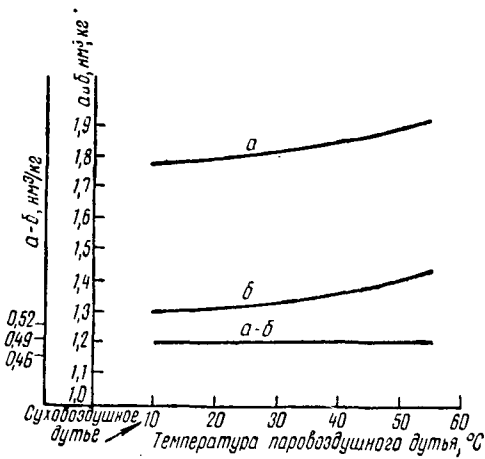


Рис. 55. Выход газа в пересчете на абс. сух. щепу в зависимости от температуры паровоздушного дутья:

а — выход газа по горловине газогенератора, *нм³/кг*; *б* — выход газа на уровне фурм периферийного дутья, *нм³/кг*; (*а—б*) — выход швельгаза, *нм³/кг*

интегрирования C оказалась равной 2,97. Поэтому приведенное уравнение можно записать так:

$$\lg K_p = -\frac{2189}{T} - 0{,}2015 \lg T - 0{,}000394T +$$

$$+ 0{,}547 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 + 2{,}97.$$

Значения константы равновесия водяного газа, установленные экспериментальным путем, весьма близки к значениям, полученным различными исследователями, изучавшими эту реакцию [35].

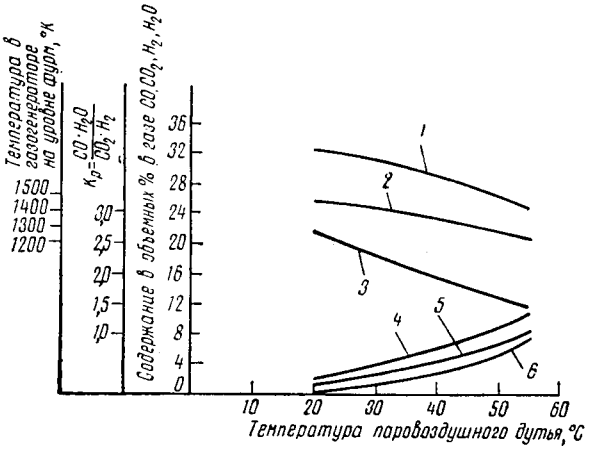


Рис. 56. Состав газа раскаленной зоны в зависимости от температуры паровоздушного дутья:
1 — содержание в газе CO; *2* — температура в зоне дутья; *3* — значение $K_p = \frac{CO \cdot H_2O}{CO_2 \cdot H_2}$ (на рисунке значения K_p увеличены в 10 раз); *4* — содержание в газе H_2; *5* — содержание в газе CO_2; *6* — содержание в газе H_2O

Таблица 123

Баланс воды в зависимости от температуры дутья (в пересчете на абс. сух. щепу)

Показатели	Температура дутья, °С				
	20	35	45	50	55
Количество воды в дутье, *г/кг*	22	64,0	109,5	144,2	174
Вода, перешедшая в газ без разложения, *г/кг*	2	12,5	29,1	39,9	53
Количество разложившейся воды, *г/кг*	20	51,5	80,4	104,3	121
Степень разложения воды, %	91	80,0	73,0	72,0	70

На основании изложенного можно считать, что при паровоздушном дутье с интенсивностью газификации щепы (в пересчете на абс. сух. древесину) до 700 *кг/м²·ч* в раскаленной зоне газогенератора между водород- и углеродсодержащими соединениями наступает равновесие, близкое к теоретически возможному, а достигнутая при этом удельная производительность газогенератора не является предельной.

Таблица 124

Значение опытной константы $\lg K_p$ и постоянного коэффициента C в зависимости от температуры паровоздушного дутья

Показатели	Температура дутья, °С				
	20	35	45	50	55
Температура в газогенераторе, °К	1458	1398	1333	1283	1213
$\lg K_p = \frac{CO \cdot H_2O}{CO_2 \cdot H_2}$	0,415	0,332	0,285	0,176	0,133
C	3,01	2,96	2,98	2,92	2,95

При газификации сухой щепы ($W = 20 \div 30\%$) температуру паровоздушной смеси (влагосодержание дутья), очевидно, надо повышать, что должно быть установлено опытным путем.

2. СЕГЕЖСКАЯ ГАЗОГЕНЕРАТОРНАЯ СТАНЦИЯ

Сегежская ГГС являлась вспомогательным цехом целлюлозного комбината и служила для снабжения газом известковых обжигательных печей основного производства.

В качестве топлива на ГГС использовали сосновую щепу с относительной влажностью около 42—45%. Эта станция перерабатывала 75—80 тыс. *пл. м³/год* щепы в трех газогенераторах, смонтированных в помещении (см. рис. 32).

Газогенераторы имеют суженную швельшахту, механическое золоудаление и пароводяную рубашку. Щепу загружали периодически вручную. Для утилизации побочных продуктов (уксусной кислоты и смолы) оборудована соответствующая установка, состоящая из двух электрофильтров, двух солевых и двух промывных скрубберов, сушилки для получения древесноуксусного порошка, нейтрализатора, отстойников, насосов и др. Газогенераторная станция была пущена в эксплуатацию в 1939 г. и только в 1955 г. состоялся пуск одного электрофильтра, а затем химического цеха, схема которого не отличается от Ижевской ГГС.

Химический цикл для улавливания уксусной кислоты, а также пульверизационная сушилка для выпарки жижки с получением древесноуксусного порошка пущены в марте 1955 г. Качество

получаемого порошка низкое (содержание уксуснокальциевой соли 55—60%, влажность порошка 2—3%).

Выделяемая из газа электрофильтрами отстойная смола успешно использовалась в регенераторной промышленности как мягчитель. При полной утилизации жидких продуктов на Сегежской ГГС можно было бы получить в год до 3000 *т* регенератной смолы, а из растворимой смолы до 3200 *т* литейного крепителя и до 1000 *т* древесноуксусного порошка.

3. ЧАГОДОЩИНСКАЯ ГАЗОГЕНЕРАТОРНАЯ СТАНЦИЯ

Чагодощинская станция построена в 1927 г. и оборудована двенадцатью газогенераторами конструкции проф. Пильника (см. рис. 29). Из них 10 газогенераторов работающих, а 2 находятся в резерве, ремонте и чистке. Газогенераторы расположены в один ряд под навесом. Площадка для загрузки топлива защищена от ветра и осадков застекленными рамами.

У каждого газогенератора имеется бункер, обеспечивающий запас щепы на 4—6 *ч*. Щепа в бункеры поступает по двум ленточным транспортерам, расположенным в надбункерной галерее. Дутье для процесса обеспечивается вентиляторами среднего давления.

Потребителями генераторного газа являются ванные печи стеклозавода.

Согласно технологической схеме, изображенной на рис. 57 на газогенераторной станции была предусмотрена утилизация жидких продуктов газификации древесины (смолы и летучих кислот). В первых скрубберах предусматривалось улавливание из газа летучих кислот раствором ацетата кальция, во вторых — промывка (сушка) газа холодной водой. Однако этот процесс не привился в производстве, хотя имелось все необходимое оборудование и были произведены соответствующие наладочные работы и исследования.

Выходящий из газогенераторов газ без предварительной электроочистки охлаждается путем орошения его водой в стояках и скрубберах. Газ газодувками направляется потребителю, расположенному на расстоянии 300 *м* от газогенераторной станции. Охлаждающая вода, содержащая смолы, летучие кислоты и другие органические продукты, сбрасывается в канализацию.

При промывке газа водой степень удаления из него смол и летучих кислот высокая, что видно из табл. 125.

Общий расход промывной воды в пересчете на 1 $м^3$ сухого газа составляет 13 *л*, в том числе: в гидрозатворах и стояках 3; в первых скрубберах 7 и во вторых скрубберах 3 *л*.

При температуре промывной воды 20° температура газа в системе изменяется следующим образом: перед стояками и гидрозатворами 110°, перед первыми скрубберами 74°, перед вторыми скрубберами 45°, после вторых скрубберов 30°.

Основное оборудование газогенераторной станции состоит из газогенераторов, гидрозатворов, электрофильтров пластинчатого типа и скрубберов.

При работе ГГС с утилизацией жидких продуктов газ из газогенератора через стояк и гидрозатвор направляется в коллектор сырого газа, установленный вдоль линии расположения газогенераторов. Из коллектора по обводному газопроводу газ поступает в скрубберы или предварительно подвергается обессмоливанию в электрофильтрах.

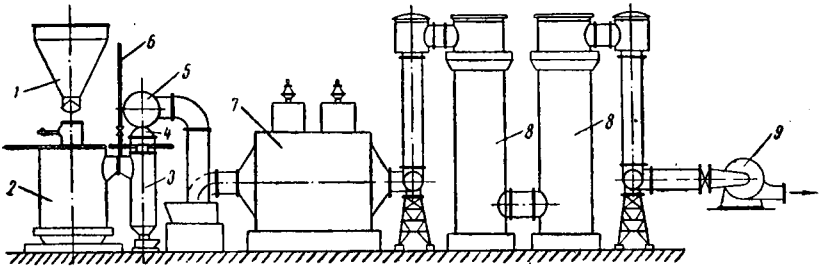


Рис. 57. Схема технологического процесса Чагодощинской ГГС:

1 — бункер для щепы; *2* — газогенератор; *3* — стояк для удаления пыли; *4* — гидрозатвор; *5* — коллектор сырого газа; *6* — труба для розжига газогенератора (свеча); *7* — электрофильтр пластинчатого типа; *8* — скрубберы для охлаждения газа; *9* — газодувка, подающая газ стеклозаводу

Осадительные электроды электрофильтров сначала были изготовлены из стальных листов, но вследствие коррозии они были заменены деревянными щитами из строганых досок толщиной 25 *мм*.

Стальные стенки аппаратуры за 6 лет работы ГГС подверглись коррозии и вышли из строя. Поэтому часть газопроводов и аппаратов заменили новыми с внутренней антикоррозийной защитой, состоящей из битумной обмазки, кошмы и досок.

Обессмоливание газа производится при помощи двух электрофильтров пластинчатого типа (см. рис. 41). Скрубберы для охлаждения газа представляют собой вертикальные безнасадочные

Таблица 125

Степень выделения смолы и летучих кислот при промывке газа водой

Место промывки газа	Летучие кислоты, %	Суммарные смолы, %
Гидрозатворы и стояки газогенераторов	38	44
Первые скрубберы	48	44
Вторые скрубберы	4	7
Количество, теряемое с газом, поступающим в печи	10	5

цилиндры диаметром 2500 и высотой 12 000 *мм*. Газ орошается проточной или циркулирующей водой через форсунки, расположенные вверху каждого скруббера. Четыре скруббера работают параллельно (по два скруббера, соединенных между собой последовательно).

Древесина измельчается двумя рубильными дисковыми машинами производительностью по дровам 40 *скл. м*^{3}/*ч* каждая.

Длина дров, поступающих для газификации 2 *м*, а диаметр от 100 до 300 *мм*. Дрова доставляются на биржу ГГС сплавом (60%) и сухопутным способом (40%).

Примерное соотношение газифицируемой древесины по породам следующее (в %): сосны 70, ели 10, лиственных (главным образом березы) 20.

Среднегодовая относительная влажность дров за ряд лет колеблется от 40 до 45%. В течение года эта влажность изменяется в пределах 35—50%. Размер щепы 40—50 *мм*.

Согласно проекту производительность Чагодощинской газогенераторной станции по дровам равна 250 тыс. скл. *м*^{3}/*год*.

Фактическое количество перерабатываемой древесины зависит от степени потребления газа. Дров расходуется от 120 до 200 тыс. *м*^{3}/*год*. В среднем каждый газогенератор работает в сеть без остановки 860 *ч* (36 суток). Чистка и подготовка газогенератора к пуску составляет около 260 *ч* (11 суток). В первые дни работы после чистки производительность газогенераторов по топливу бывает максимальной, а затем постепенно падает, так как накапливающаяся в зольной чаше зола создает непрерывно возрастающее сопротивление подаваемому дутью.

На рис. 58 наглядно показана динамика роста и падения интенсивности газификации, т. е. удельной производительности газогенераторов по абс. сух. щепе (*кг*/*м*$^2 \cdot$ *ч*), в зависимости от времени. Среднепроизводственная интенсивность газогенераторов по абс. сух. древесине колеблется в пределах 130—150 *кг*/*м*$^2 \cdot$ *ч*. Производительность газогенераторов в переводе на дрова составляет 50—57 *пл. м*^{3}/*сутки*.

При газификации щепы применяется сухое дутье, т. е. к воздуху, подаваемому в газогенератор, водяной пар не добавляется.

В начале работы газогенератора (первые 50—60 *ч*) применяют главным образом периферийное дутье, а затем постепенно увеличивают подачу воздуха через колосники центральной дутьевой головки. Давление воздуха как центрального, так и периферийного дутья в начале рабочего периода составляет 10—50 *мм* вод. ст., возрастая к концу рабочего периода газогенератора до 80—100 *мм* вод. ст.

Газогенераторы Чагодощинской газогенераторной станции работают по схеме свободного слоя топлива (щепы). Высота этого слоя в газогенераторе не постоянна: она зависит от влажности щепы, производительности газогенератора и др.

Загрузку топлива в газогенератор производят в зависимости от температуры выходящего газа. В начальный момент после загрузки щепы температура выходящего из газогенератора газа падает. Затем наступает постепенное повышение температуры до требуемого значения, после чего производят следующую загрузку щепы.

Для контроля за температурой газа, выходящего из газогенератора, служат термопары, установленные в горловинах.

На рис. 59 приведены данные об изменении температуры газа между отдельными загрузками щепы.

Щепа загружалась, когда температура выходящего из газогенератора газа достигала 150° С. В зависимости от принятого температурного режима работы ГГС загрузка щепы в газогенераторы производится и при других температурах выходящего газа.

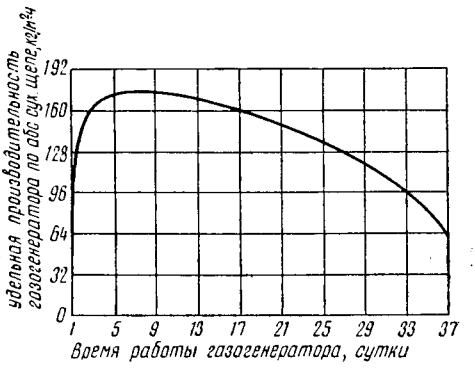


Рис. 58. Изменение удельной производительности газогенераторов Чагодощинской ГГС за рабочий период

Генераторный газ поступает потребителю при температуре 18—25°. Теплота сгорания газа (низшая) равна 1300—1400 *ккал/м*³. Если ввести температурную поправку, а также поправки на влажность и подсос воздуха, который колеблется в пределах 6—16%, то теплота сгорания газа (низшая) в горловине газогенератора составит 1550—1600 *ккал/нм*³.

Выход газа в зависимости от влажности газифицируемой щепы, производительности газогенератора и других факторов изменялся от 1,3 до 2,5 *нм*³/*кг* (в пересчете на абс. сух. древесину). Состав газа в горловине газогенератора следующий (в объемных %): CO_2 — 6÷7; CO — 27÷30; CH_4 — 2,6÷3,6; H_2 — 8÷12; O_2 — 0,2÷0,4; N_2 — 48÷50.

На основании производственных данных ниже приводятся показатели о выходах газа в зависимости от производительности газогенераторов по щепе и температуры газа, выходящего из газогенераторов.

Из рис. 60 видно, что с повышением удельной производительности газогенераторов (в пересчете на абс. сух. щепу) выход газа уменьшается. Очевидно, что уменьшение выхода газа сопровождается повышением удельного выхода смолы. Зависимость выхода газа от температуры его в горловине газогенератора показана на рис. 61. Выше было сказано, что повышение температуры

газа вследствие работы газогенератора при понижении слоя щепы иногда приводит к совмещению зон сушки и швелевания с зоной раскаленного угля. При работе газогенератора при низком слое

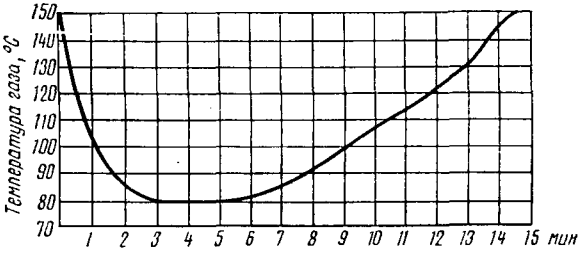


Рис. 59. Изменение температуры газа, выходящего из газогенератора, в период между загрузками щепы

увеличивается выход газа и падает его теплота сгорания. При этом снижается и выход жидких продуктов.

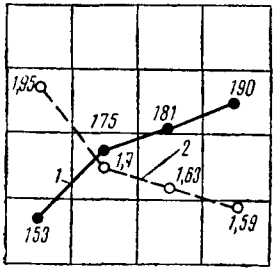


Рис. 60. Зависимость выхода газа от производительности газогенератора:

1 — удельная производительность газогенератора по абс. сух. щепе, *кг/м² · ч*; *2* — выход сухого газа в пересчете на абс. сух. щепу, *нм³/кг*

При газификации щепы выход жидких продуктов от веса абс. сух. древесины составляет (в %): суммарной смолы 16—18%, летучих кислот (в пересчете на уксусную) 3—4%, метилового спирта 0,5—0,6%.

Суммарная смола содержит около 65% отстойной смолы. Содержание жидких продуктов в газе, выходящем из газогенератора (в *г/нм³*): суммарной смолы 90—110, летучих кислот (в пересчете на уксусную) 16—24, метилового спирта 3—5, воды 480—520.

Обращает на себя внимание относительно повышенное содержание в суммарных смолах отстойной смолы (65%). При газификации преимущественно сосновой щепы (70%), выход нерастворимой смолы бывает выше, чем из еловой древесины и древесины лиственных пород.

Чагодощинская ГГС в течение ряда лет испытывала недостаток в древесном топливе, поэтому газогенераторы пришлось постепенно перевести на торф.

Газификация щепы при различной производительности газогенератора. Для исследования была использована смесь сосновой (76%), еловой (12%) и березовой (12%) щепы, относительная

влажность которой была 38—40%, а средневзвешенный размер — 58 *мм*. Испытание производилось при установившемся процессе. Загружали щепу в газогенератор при температуре выходящего газа 150°, после чего температура газа быстро падала, примерно до 74—76°. За 24 *ч* производилось 100—110 загрузок щепы. Объем одной загрузочной коробки 2 *нас. м*³, или 300 *кг* щепы в пересчете на абс. сух. древесину. Через шуровочные отверстия определяли слой щепы, который увеличивался по мере повышения производительности газогенератора. Слой топлива в газогенераторе до и после загрузки щепы изменялся в пределах 200—300 *мм*.

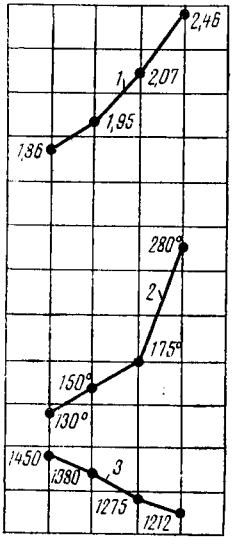


Рис. 61. Зависимость выхода газа и его низшей теплоты сгорания от температуры газа, выходящего из газогенератора:

1 — выход сухого газа в пересчете на абс. сух. щепу, *нм*³/*кг*; *2* — температура газа, выходящего из газогенератора, °С; *3* — теплота сгорания газа (низшая), *ккал*/*нм*³

Выход газа и жидких продуктов вычисляли по углеродному балансу. Для этого при каждом испытании производили шестикратное определение состава парогазовой смеси, выходящей из газогенератора, и точный учет израсходованной щепы.

Давление дутья равнялось 80—90 *мм* вод. ст., а давление газа на выходе из газогенератора 5—8 *мм* вод. ст.

Присадка пара к воздуху, подаваемому в газогенератор, не производилась.

Из табл. 126 видно, что с увеличением удельной производительности газогенератора (до 174 вместо 162 *кг*/*м*² · *ч*) уменьшался выход газа (1,64 вместо 1,78 *нм*³/*кг*) и увеличивался выход смолы (20,6 вместо 15,7%). Интересно отметить, что выход газа в пересчете на сечение шахты газогенератора почти не изменялся и в данном случае составлял 285—289 *нм*³/*м*² · *ч*. Иначе говоря, с повышением производительности газогенератора по щепе общий выход газа в единицу времени оставался постоянным. Эти данные показывают, что при увеличении производительности газогенератора в указанных пределах, работающего при свободном слое топлива, происходит значительное увеличение выхода жидких продуктов. По замерам уровня топлива и раскаленного угля в газогенераторе видно, что толщина слоя щепы в каждом опыте была относительно небольшой (опыт 1—280 *мм*, опыт 2 — 310 *мм* и опыт 3—360 *мм*).

Сушка и пиролиз щепы протекали в этом слое соответственно за следующее время: опыт 1 — 29 *мин*, опыт 2 — 33 *мин*, опыт 3 — 40 *мин*.

Таблица 126

Испытание газогенератора при различной производительности по щепе

Показатели	Опыт 1	Опыт 2	Опыт 3
Расход абс. сух. щепы, *кг/ч*	1230	1190	1145
Интенсивность газификации по абс. сух. щепе, *кг/м²·ч*	174	168	162
Высота слоя щепы над уровнем фурм периферийного дутья, *мм*	3200	2700	2110
Высота раскаленного слоя угля над уровнем фурм периферийного дутья, *мм*	2920	2390	1750
Температура газа на выходе из газогенератора, °C	75—150	75—150	75—150
Выход газа в пересчете на абс. сух. щепу, *нм³/кг*	1,64	1,72	1,78
Состав газа, объемные %:			
CO_2	6,35	6,79	6,27
CO	28,60	28,60	29,70
CH_4	2,96	2,35	2,66
H_2	9,52	9,92	9,22
O_2	0,20	0,20	0,20
N_2	52,37	52,14	51,95
Выход жидких продуктов от веса абс. сух. щепы, %:			
смолы	20,6	17,6	15,7
летучих кислот (в пересчете на уксусную)	2,7	2,8	2,6
метилового спирта	0,46	0,52	0,46
реакционной воды	24,0	23,0	22,0

Проведенные опыты показали, что увеличение скорости пиролиза древесины при повышении производительности газогенератора и при газификации щепы в условиях свободного слоя в шахте газогенератора положительно влияет на выход жидких продуктов.

Газификация щепы различного измельчения. Для определения влияния степени измельчения щепы на выход жидких продуктов газификации было проведено два опыта. Исходным сырьем являлась щепа, содержащая 60% сосны, 25% ели, 15 % березы и осины.

Опыт производили на шести работающих газогенераторах.

Размер щепы изменяли путем соответствующей перестановки ножей рубильной машины. Учет жидких продуктов за время опытов производили путем непосредственного замера их количества в стояках газогенераторов и в электрофильтре. Кроме того, при помощи лабораторной установки определяли количество конденсируемых продуктов в газе, выходящем из электрофильтров.

Количество абс. сух. древесины в 1 пл. $м^3$ дров согласно замерам было равно 442 *кг*. Влажность газифицируемой щепы 43—44%. При газификации крупной щепы (65 *мм*) выход газа составил 1,81 $нм^3/кг$ и при работе газогенератора на более мелкой щепе (45 *мм*) — 1,75 $нм^3/кг$. Выход суммарного смоляного конденсата, выделенного из газа в стояках и электрофильтре, в пересчете на дрова составлял 134—142,4 *кг/пл.* $м^3$ (табл. 127). Со-

Таблица 127

Основные показатели работы ГГС на щепе различного измельчения

Показатели	Газификация щепы	
	крупной	мелкой
Продолжительность испытания, *ч*	54	60
Количество переработанных дров, *пл.* $м^3$	735	740
Относительная влажность щепы, %	43	44
Интенсивность газификации по абс. сух. щепе, $кг/м^2 \cdot ч$	136,5	125
Средний размер щепы, *мм*	65	45
Средняя высота слоя топлива в газогенераторах, *мм*	3700	4000
Температура дутья, °С	12	12
Температура газа в коллекторе сырого газа, °С	76	78
Температура газа после электрофильтра, °С	74	76
Выход газа от веса абс. сух. щепы, $нм^3/кг$	1,81	1,75
Состав газа, объемные %:		
CO_2	5,7	6,8
CO	30,5	29,4
CH_4	1,0	1,8
H_2	8,9	8,8
O_2	0,4	0,5
N_2	53,5	52,7
Теплота сгорания газа (низшая), $ккал/нм^3$	1240	1270
Содержание конденсата в очищенном газе после электрофильтра $г/нм^3$	480	535
Количество конденсатов, *т*:		
в стояках и газопроводах до электрофильтра	27,5	25,8
в электрофильтре	71 (100%)	80 (100%)
в том числе:		
жижки	35,3 (49,8%)	36,3 (45,60%)
отстойной смолы	35,7 (50,2%)	43,7 (54,40%)
в очищенном газе (после электрофильтра)	282	307
Выход суммарного конденсата в пересчете на газифицируемые дрова, *кг/пл.* $м^3$	134 (100%)	142,4 (100%)
В том числе:		
в стояках и газопроводах до электрофильтра	37,5 (28%)	34,4 (24%)
в электрофильтре	96,5 (72%)	108,0 (76%)

став этого конденсата следующий (в %): смолы 41—45, летучих кислот (в пересчете на уксусную) 6—8, воды 47—51.

В стояках выделялось 24—28% газогенераторного конденсата, а на долю электрофильтра приходилось 72—76%. Из табл. 128 видно, что по анализу газогенераторные конденсаты из

Таблица 128

Анализ конденсата, полученного при работе ГГС на щепе различного измельчения

Показатели	Газификация щепы	
	крупной	мелкой
Анализ конденсата из стояков и газопроводов %:		
летучие кислоты (в пересчете на уксусную)	3,8	4,4
растворимая смола	6,2	6,5
нерастворимая смола	1,8	1,5
Конденсат из электрофильтров, %:		
жижка	49,8	45,4
отстойная смола	50,2	54,6
Анализ жижки из электрофильтра, %:		
растворимая смола	35,6	36,8
летучие кислоты (в пересчете на уксусную)	7,86	9,1
метиловый спирт	1,20	1,75
эфиры (в пересчете на метилацетат)	1,06	1,05
альдегиды (в пересчете на формальдегид)	0,53	0,49
кетоны (в пересчете на ацетон)	0,24	0,17
аллиловые спирты	0,50	1,15
Анализ смолы из электрофильтра, %:		
летучие кислоты (в пересчете на уксусную)	5,8	8,4
влажность	21,2	18,6
Анализ конденсата очищенного газа (после электрофильтра), %:		
растворимая смола	1,28	1,35
летучие кислоты (в пересчете на уксусную)	1,73	2,18
метиловый спирт	0,47	0,68
эфиры (в пересчете на метилацетат)	0,41	0,42
альдегиды (в пересчете на формальдегид)	0,20	0,19
кетоны (в пересчете на ацетон)	0,10	0,08
аллиловые спирты	0,28	0,45

электрофильтра значительно отличаются от конденсата из стояков и газопроводов. В конденсатах из стояков и газопроводов содержание летучих кислот и смолы заметно ниже, чем в конденсатах из электрофильтров. Судя по данным анализов и учета конденсата, в стояках и электрофильтре выделено из газа 92% смолы, а летучих кислот 55%.

Выход жидких продуктов по горловине газогенератора приведен в табл. 129, откуда видно, что с уменьшением размера щепы увеличивается выход смолы и других органических продуктов.

На основании данных испытаний можно считать, что на Чагодощинской газогенераторной станции при газификации дров (щепы) выход абс. сух. смолы за вычетом потерь составляет 55—64 *кг/пл. м*^{3}.

Таблица 129

Выход жидких продуктов при газификации щепы различного измельчения (в % от веса абс. сух. щепы)

Продукты, получаемые при газификации	Газификация щепы	
	крупной	мелкой
Суммарная смола	13,60	15,70
Летучие кислоты (в пересчете на уксусную)	3,33	4,55
Метиловый спирт	0,62	1,07
Эфиры (в пересчете на метилацетат)	0,59	0,65
Альдегиды (в пересчете на формальдегид)	0,29	0,39
Кетоны (в пересчете на ацетон)	0,13	0,12
Аллиловые спирты	0,40	0,70
Реакционная вода	22,80	24,50

4. ГАЗОГЕНЕРАТОРНАЯ СТАНЦИЯ НИЖНЕТАГИЛЬСКОГО МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ЗАВОДА

Газогенераторная станция установлена под навесом и служит для снабжения газом двух мартеновских печей. Газогенераторы представляют собой прямоугольные кирпичные шахты сечением 1350×2000 и высотой 6100 *мм* с футеровкой из огнеупорного кирпича. Наружный металлический кожух у газогенератора отсутствует. Каждая шахта снабжена загрузочной коробкой простейшего типа и колосниковой решеткой размером 1000×1350 *мм*.

Четырнадцать газогенераторов расположены в двух блоках: в одном блоке шесть шахт, а в другом восемь (см. рис. 27).

Дутье осуществляется двумя вентиляторами производительностью по воздуху 6000 *м*^{3}*/ч* каждый, развивающих максимальное давление 50 *мм* вод. ст.

Дутье сухое, т. е. без присадки пара. Каждый из вентиляторов обслуживает один блок газогенераторов. До перевода ГГС на щепу топливом для станции служили метровые дрова: 50% хвойных и 50% лиственных. Относительная влажность дров 37—45%, иногда достигала 50%.

Расход дров от 80 до 100 тыс. *скл. м*^{3}*/год*. Из 14 шахт газогенераторов в сеть работает 12, две шахты находятся в резерве.

Дрова поступают на ГГС по железной дороге. Для питания газогенераторной станции щепой установлены две дисковых рубильных машины, производительностью по дровам 39 *скл. м³/ч* каждая. Рубильная машина приводится в действие электродвигателем мощностью 140 *квт*. Перевод газогенераторной станции с дров на щепу был осуществлен с целью облегчения условий труда, экономии топлива и повышения качества газа.

При работе газогенераторной станции на дровах расход на 1 *т* стали составлял 1,88 *скл. м³* древесины при одновременном расходе 168 *кг* жидкого топлива (мазут). При работе газогенераторов на щепе расход топлива на 1 *т* стали уменьшился до 1,45—1,6 *скл. м³* дров и 90—100 *кг* мазута, а производительность каждого газогенератора (шахты) по древесине увеличилась примерно с 20 до 25 *скл. м³/сутки*. Давление газа в горловине газогенераторов 13—15 *мм* вод. ст., а у печей 5—8 *мм* вод. ст.

Состав газа (в объемных %): CO_2 — 7,0÷8,5; O_2 — 0,3÷0,4; CO — 25÷26; CH_4 — 2,9÷3,1; H_2 — 9,4÷9,6; N_2 — 52÷55.

Теплота сгорания (низшая) сухого газа из щепы 1250—1300 *ккал/м³*.

Удельная производительность газогенераторов на дровах была невысокая и составляла в пересчете на абс. сух. древесину 115 *кг/м²·ч* (хотя при этом и применялось принудительное дутье). При работе газогенераторов на щепе удельная производительность их повысилась до 140—160 *кг/м²·ч*.

Охлаждение и осушка газа не производятся. Выпадающий в газопроводе конденсат выводится через гидрозатворы, откуда отстойная смола направляется в газогенераторы, а жижка самотеком стекает в специальную железнодорожную цистерну емкостью 30 *м³* и ежедневно вывозится за пределы завода.

Температура газа перед печами зависит от времени года и составляет 70—90°.

5. АМЗИНСКАЯ ГАЗОГЕНЕРАТОРНАЯ УСТАНОВКА

Амзинская газогенераторная установка построена в 1959 г. Оборудование для топливоприготовления и топливоподачи, газогенератор, сушилка, газоочистная аппаратура, сборники жижки и смолы установлены на соответствующих фундаментах и открытых железобетонных площадках вне здания. Производительность ГГУ по древесине согласно проекту 25 тыс. *пл. м³/год*.

Эта установка является вспомогательным цехом Амзинского лесохимического завода.

Получаемый древесногенераторный газ используется в качестве топлива. При переводе топки локомобиля САМПО-400 с дров на генераторный газ количество получаемой электроэнергии в пересчете на газифицируемые дрова равнялось 84 *квт·ч/пл. м³*. При работе этого же локомобиля на дровяном топливе количество вырабатываемой электроэнергии составляло 135—150 *квт·ч/пл.м³*.

В топках парокотельной завода генераторный газ сжигается вместе с мазутом.

Газогенераторные конденсаты перерабатываются в химическом цехе завода с целью получения из них уксусной кислоты и затем этилацетата, кондиционной смолы и других лесохимических продуктов.

Сырьем для ГГУ служат метровые дрова (главным образом осиновые с примесью липовых и березовых в количестве 30—40%).

Коры в дровах содержится 9—20%, гнили 5—60%. Количество абс. сух. древесины зависит от породного состава дров и колеблется от 420 до 490 *кг/пл. м*^{3}.

Дрова, предназначенные для газификации, измельчаются в барабанной машине ДРС-1 Грибановского завода. Скорость вращения барабана 280 *об/мин*. Производительность машины по дровам 20 *пл. м*^{3}*/ч*. Мощность двигателя 70 *квт*. Кроме дров, машина удовлетворительно измельчает горбыли и рейки лесопильного завода, но для лесосечных отходов она не пригодна. Выход щепы из дров составляет 3 *нас. м*^{3}*/пл. м*^{3}. Количество древесины в щепе зависит от состава исходных дров. Так, при 30%-ной влажности осиновых дров в щепе содержится 136 *кг/нас. м*^{3} абс. сух. древесины; при составе дров 65% осины, 27% липы и 8% березы содержание абс. сух. древесины равно 140 *кг/нас. м*^{3}; при составе дров 52% осины 17% липы и 31% березы — 160 *кг/нас. м*^{3}. Щепа Амзинской ГГУ очень мелкая. Размер ее по длине волокон следующий (в весовых %): до 2 *мм* 20—23; 2—5 *мм* 60—70; 5—10 *мм* 6—8; от 10 *мм* и более 1—2. Относительная влажность дров, поступающих на ГГУ с биржи, равна 25—35% и редко 40—45%, поэтому иногда установка может работать без сушки щепы.

На Амзинской ГГУ были осуществлены различные технологические схемы, отличающиеся между собой в основном методом обессмоливания газа и конструкцией сушилки для щепы. Для получения смолы применялся электрофильтр или центробежный смолоотделитель, для сушки щепы шнековая или барабанная сушилка.

Описание технологической схемы с применением центробежного смолоотделителя (рис. 62). Дрова, укладываемые по 25—30 *скл. м*^{3} на каждую платформу, по внутризаводской рельсовой дороге мотовозом доставляются с биржи к рубильной машине *1*. Дрова загружают в рубильную машину вручную. Щепа ковшевым элеватором *2* поднимается на высоту 16 *м*, а затем горизонтальным пластинчатым питателем *3* подается в бункер *4* сушилки *5*. В бункере *4* имеется ворошитель, обеспечивающий равномерный сход щепы. Ворошитель представляет собой вертикальный лопастной висящий вал с верхним приводом. Скорость вращения вала 10 *об/мин*.

Сушка щепы производится в шнековой сушилке за счет тепла отходящих газов котельной.

Сырая щепа из бункера через шиберный питатель поступает в верхний барабан сушилки *5*, затем щепа проваливается во второй барабан. Перемещение щепы в барабанах производится лопастями, укрепленными на валу. Скорость вращения вала у верхнего барабана 48, у нижнего 52 *об/мин*.

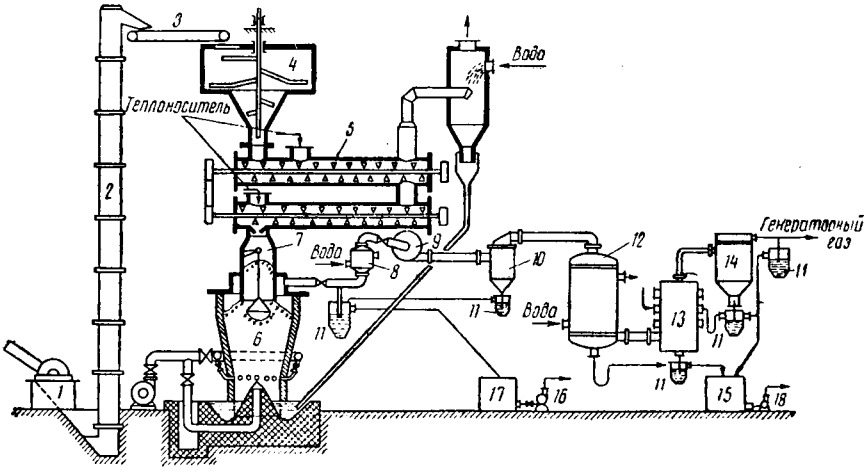


Рис. 62. Схема Амзинской газогенераторной установки с центробежным смолоотделителем и сушилкой:

1 — рубильная машина для дров; *2* — ковшевой элеватор для щепы; *3* — пластинчатый питатель; *4* — бункер для щепы; *5* — шнековая двухбарабанная сушилка; *6* — газогенератор; *7* — загрузочная коробка; *8* — холодильник для газа $F=15$ *м*²; *9* — центробежный вентилятор-смолоотделитель; *10* — каплеулавливатель; *11* — гидрозатворы; *12* — конденсатор-холодильник $F=120$ *м*²; *13* — пенный аппарат для улавливания кислоты; 14 — мультициклон из шести элементов; 15 — сборник кислой воды и обессмоленной жижки; *16* — насос для смолы; *17* — сборник смолы; *18* — насос для кислой воды

Теплоноситель направляется в барабан сушилки дымососом, установленным у дымохода котельной завода. В верхнем барабане дымовые газы идут параллельно движению щепы, а в нижнем по схеме противотока.

При вращении вала лопасти интенсивно подбрасывают щепу, чем достигается хороший контакт между высушиваемым материалом и газом. Сухая щепа из нижнего сушильного барабана поступает в приемную загрузочную коробку *7* газогенератора *6*. При помощи распределительного конуса щепа рассыпается по всему сечению шахты (см. рис. 34).

Стенки шахты газогенератора футерованы огнеупорным кирпичем. Между кирпичной кладкой и стальной стенкой газогенератора имеется засыпка толщиной 30—40 *мм*, сделанная из шамотной крошки. Засыпка необходима для того, чтобы обеспечить

свободное температурное расширение кирпичной кладки при работе и остановке газогенератора.

Дутье подается двойное: периферийное и центральное. При нормальной работе газогенератора подача воздуха через центральную дутьевую головку равна примерно 15%, а через фурмы периферийного дутья подается около 85%.

Такое распределение дутья обеспечивает большую равномерность подачи воздуха по сечению газогенератора. Число фурм для периферийного дутья 12. В Амзинском газогенераторе центральное дутье с 1963 г. полностью отключено, отчего работа установки не ухудшилась.

Случайные нарушения режима дутья в сторону увеличения подачи воздуха через центральную дутьевую головку при неподвижной зольной чаше приводили к местному выгоранию, а затем обвалу топлива в шахте и к появлению хлопков.

Внутренний диаметр газогенератора на уровне подачи дутья через фурмы равен 2000 *мм*, вверху 3400 *мм*. Общая высота шахты газогенератора 4800 *мм*, а высота слоя топлива над фурмами около 3200 *мм*.

Загрузка газогенератора щепой впервые в практике газификации древесины полностью механизирована. Этот же газогенератор около 2 лет работал при периодической ручной загрузке щепы, осуществляемой при помощи загрузочной коробки. В настоящее время отбор газа производится через горловину, расположенную по центру крышки газогенератора. Однако на протяжении ряда лет отбор газа из шахты производился по двум горловинам, находящимся на крышке газогенератора. Диаметр каждой горловины 500 *мм*. Две горловины для отбора газа создавали некоторые неудобства при эксплуатации газогенератора: затрудняли шуровку топлива, проход по крышке и площадке газогенератора и т. п. Каждая фурма периферийного дутья снабжена регулировочной задвижкой.

У газогенератора системы проф. Пильника периферийное дутье осуществляется при помощи кольцевой камеры и соответствующих отверстий в нижней части шахты. Для чистки этих отверстий имеются лючки, расположенные в дутьевой камере. Однако регулировка подачи воздуха в газогенератор через отверстия периферийного дутья здесь невозможна, что является существенным недостатком этих газогенераторов по сравнению с Амзинским.

При наблюдении за температурой топлива при помощи установленных в шахте термопар и регулировании расхода дутья по фурмам можно обеспечить равномерный сход щепы по высоте и сечению шахты, что имеет большое значение для правильной эксплуатации газогенератора.

На большинстве промышленных газогенераторов, работающих на других видах топлива (торфе, буром угле и др.), для

равномерной газификации топлива приходится прибегать к шуровке топлива стальными штангами. Эта операция производится часто вручную. Так, на Ижевском ГГС шуровка топлива является обязательной и включена в правила эксплуатации газогенераторов. На Амзинской ГГУ шуровка щепы осуществляется очень редко, обычно после длительной остановки газогенератора перед его пуском.

Отсутствие надобности в частой и систематической шуровке щепы указывает на то, что сход щепы при работе газогенератора удовлетворительный (хлопки почти отсутствуют).

Выгреб золы из шахты производится один раз за 8 *ч*. Золу выгребают вручную ввиду того, что зольная чаша неподвижна. Выгребаемая зола содержит не более 7% несгоревшего угля (в пересчете на абс. сух. золу). Это указывает на удовлетворительную полноту использования горючей части топлива в зоне подачи дутья и наиболее правильную конструкцию профиля зольной чаши. Конус, расположенный в центральной части зольной чаши, сдвигает древесный уголь к фурмам, улучшая условия для пронизывания воздухом кольцевого слоя угля.

При нормальной работе газогенератора в загрузочной коробке *7* поддерживается уровень щепы в определенных пределах. Чтобы слой щепы не опустился ниже допустимого, во время работы периодически пользуются щупом. Если уровень щепы в коробке оказывается на верхнем пределе, вращение валов сушилки останавливают и загрузка щепы в коробку прекращается. После достижения в коробке нижнего допустимого уровня щепы, сушилка вновь пускается в ход. При остановке сушилки подача теплоносителя не прекращается.

Дутье в газогенераторе паровоздушное с температурой 50—65°.

Парогазовая смесь из шахты газогенератора поступает в небольшой поверхностный холодильник *8*, а затем в центробежный смолоотделитель *9*. Обессмоленный газ из каплеулавливателя *10* направляется в конденсатор-холодильник *12*. Доулавливание летучих кислот производится водой в пенном аппарате *13* и мультициклоне *14*. Сырой генераторный газ направляется в топки локомобиля или паровых котлов. Газопроводы диаметром 300 *мм*, по которым генераторный газ направляется из одного аппарата в другой, изготовлены из нержавеющей стали. Длина газопровода между ГГУ и котельной завода 50 *м*, а внутренний диаметр 500 *мм*. Этот газопровод был изготовлен из коротких фланцевых стальных труб длиной 1500 *мм*, футерованных внутри досками (толщина 25 *мм*) по битуму и кошме. Впоследствии этот газопровод был заменен фанерным с диаметром 300 *мм*.

Конденсат (сырая, суммарная смола) из холодильника *8* и каплеулавливателя *10* направляется в бак для смолы *17*. Обессмоленный конденсат (жижка) из конденсатора-холодильника *12*,

кислая вода из пенного аппарата *13*, мультициклона *14* и из газопровода очищенного газа стекают в сборник *15* через гидрозатворы *11*.

Суммарная смола и смесь обессмоленной жижки и кислой воды по разным трубопроводам перекачиваются центробежными насосами *16* и *18* в химический цех завода. Эти трубопроводы сделаны из фанерных труб диаметром 100 *мм*.

Температурный и гидравлический режимы работы установки. Первое время Амзинская ГГУ работала без сушки щепы, поэтому температура газа, выходящего из газогенератора не превышала 80—90°.

После пуска сушилки температура газа поднялась до 110—130° и выше. При работе сушилки щепа поступает в шахту нагретой до 60—65°, поэтому выходящий из слоя топлива газ охлаждается значительно меньше, чем при поступлении в газогенератор холодной щепы. Особенно заметно влияние сушки щепы на температуру газа при работе ГГУ в зимнее время, когда для газификации используется мерзлая щепа.

Температурный режим ГГУ при работе с сушилкой приведен ниже:

Температура газа и дутья, °С

В горловине газогенератора	110—130
После холодильника	78—85
После центробежного смолоотделителя	75—82
После конденсатора-холодильника	55—68
После пенного аппарата	40—55
Дутье (паровоздушное)	50—65

Давление дутья и газа по системе аппаратов, *мм* вод. ст.

Дутья перед фурмами газогенератора	100—140
Газа:	
в горловине газогенератора	3—8
после холодильника (разрежение)	110—130
после смолоотделителя	180—200
перед конденсатором-холодильником	175—195
перед пенным аппаратом	150—180
после пенного аппарата	60—70
перед топкой котлов	45—50
Дутья, развиваемого воздуходувкой	300—310

Из приведенных данных видно, что фурмы и слой топлива в газогенераторе оказывают сопротивление примерно 100—130 *мм* вод. ст., холодильник, установленный до центробежного смолоотделителя, 120—130 *мм* вод. ст. и пенный аппарат около 100 *мм* вод. ст.

Из холодильника, установленного перед смолоотделителем, и из смолоотделителя стекает нерасслаивающийся конденсат. Конденсат из конденсатора-холодильника и кислая вода из пенного

Анализ газогенераторных конденсатов Амзинской ГГУ *Таблица 130*

Конденсат	Удельный вес при 20°	Содержание, %						
		летучие кислоты (в пересчете на уксусную)	метиловый спирт	эфиры (в пересчете на метилацетат)	формальдегид	кетоны (в пересчете на ацетон)	растворимая смола	Вода
Из холодильника перед смолоотделителем	1,2—1,229 (1,220)	8,3—10,6 (9,5)	—	—	—	—	—	6,3—11,8 (10)
Из смолоотделителя	1,14—1,21 (1,167)	8,3—13,0 (10)	—	—	—	—	—	16—25 (21)
Смесь конденсатов из холодильника и смолоотделителя	1,17—1,29 (1,21)	9,3—12,6 (10)	—	—	—	—	—	19—23 (20)
Из конденсатора-холодильника (жижка)	1,02—1,036 (1,024)	7,5—10 (8,5)	0,72—0,76 (0,74)	0,3—0,6 (0,5)	0,55—0,9 (0,8)	0,52—0,76 (0,68)	1—3 (1,75)	—
Из пенного аппарата (кислая вода)	1,021—1,031 (1,027)	7—7,5 (7,3)	0,65—0,9 (0,8)	—	—	—	2,2—3,5 (3,3)	—
Смесь из конденсатора-холодильника (конденсата) и из пенного аппарата (кислой воды):								
жижка	1,020—1,032 (1,024)	7,1—8,8 (7,6)	0,7—0,82 (0,76)	0,16—0,53 (0,22)	0,5—0,79 (0,7)	0,4—0,73 (0,7)	2—2,7 (2,3)	—
отстойная смола	1,14—1,18 (1,65)	4—6 (5)	—	—	—	—	—	20—26 (22)
всплывные масла	1,004—1,01 (1,008)	5,5—7 (6)	—	—	—	—	—	23—27 (25)
Из газопровода перед топкой котельной	—	0,35—0,66 (0,50)	—	—	—	—	—	—

Примечание. В скобках дано среднее значение показателей.

аппарата содержат 1,9 отстойной смолы и до 0,1% всплывных масел. Это указывает на то, что очистка газа от смолы происходит недостаточно удовлетворительно.

Из данных табл. 130 видно, что конденсат (смола) из холодильника и смолоотделителя имеет влажность в среднем 10—21%. При такой влажности газогенераторные конденсаты, особенно из древесины лиственных пород, не отстаиваются. Содержание летучих кислот (в пересчете на уксусную) в кислой воде и жижке из конденсатора-холодильника равно 7,3—8,5%. Растворимой смолы в этих конденсатах немного (1,75—3,3%), что облегчает их переработку. Нейтральных летучих продуктов (метилового спирта, эфира, альдегидов, кетонов и др.) в суммарной жижке содержится более 2%.

В холодильнике до смолоотделителя и в пенном аппарате улавливается сравнительно небольшое количество продуктов (табл. 131). Однако эти аппараты создают большое гидравлическое сопротивление. Так, из всего напора, развиваемого центробежным смолоотделителем (300—330 *мм* вод. ст.), на преодоление указанного гидравлического сопротивления расходуется примерно 70%. Это явление неизбежно приводит к нерациональному расходу электроэнергии.

Таблица 131

Степень улавливания жидких продуктов из газа различными аппаратами Амзинской ГГУ

Аппарат	Температура, °С	Содержание, %			
		летучих кислот (в пересчете на уксусную)	суммарной смолы	древесного спирта	воды
Холодильник до смолоотделителя	78—85	2—5	4—8	Нет данных	2—4
Смолоотделитель	75—82	25—40	70—90	14—18	7—9
Конденсатор-холодильник	55—68	30—45	6—10	18—24	50—70
Пенный аппарат	40—55	12—18	2—6	11—15	6—8
Потери с газом в топку	35—40	5—9	1—3	40—60	18—24

Примечание. Под древесным спиртом подразумеваются летучие нейтральные вещества (метиловый спирт, эфиры, кетоны, альдегиды и др.).

Средний выход конденсатов в пересчете на единицу перерабатываемого сырья на Амзинской ГГУ по опытным данным следующий: суммарной смолы из холодильника и смолоотделителя 75 *кг/пл. м*^{3} (25%), жижки из конденсатора-холодильника 160 *кг/пл. м*^{3} (52%), кислой воды из пенного аппарата 70 *кг/пл. м*^{3} (23%), всего 305 *кг/пл. м*^{3} (100%).

Выходы конденсатов, достигнутые при проведении специальных опытов, близки к производственным, полученным на Амзинском заводе за 1961—1964 гг. (табл. 132).

Таблица 132

Выход газогенераторных конденсатов на Амзинской ГГУ

Конденсат	Выход конденсатов по годам, *кг/пл. м*³				Средний выход	
	1961	1962	1963	1964	*кг/пл. м*³	%
Суммарная смола	29—85 (65)	41—113 (77)	57—71 (63)	47—62 (57)	65	21
Суммарная жижка	195—310 (260)	190—235 (226)	216—286 (250)	202—262 (243)	245	79
Всего конденсата	325	303	313	300	310	100

Примечание. В скобках дано среднее значение показателей.

Смесь конденсатов из смолоотделителя и холодильника содержит растворимую и отстойную смолу. Промывка этих конденсатов горячей водой показала, что содержащаяся в них смола наполовину состоит из растворимой. Если всю растворимую смолу, полученную в конденсаторе-холодильнике, пенном аппарате и смолоотделителе принять за 100%, то на долю смолоотделителя приходится 75—80%.

Промытая горячей водой отстойная смола имела влажность 10—13% и содержала около 3% летучих кислот, тогда как исходная смола до промывки содержала 20—25% воды и 4—6% летучих кислот.

Выход сырой промытой смолы от веса сырой исходной смолы, подвергаемой промывке, равен 30—40%.

Таблица 133

Разгонка промытой и непромытой смолы при атмосферном давлении

Смола из смолоотделителя	Конечная температура разгонки (в парах), °С	Средний выход от веса абс. сух. смолы, %		
		масла	пек	газ и потери
До промывки	190—205	12	71	17
После промывки . . .	270—305	50	35	15

Из табл. 133 видно, что при разгонке газогенераторной смолы, содержащей около 50% растворимой смолы, выход масел резко падает (12%) и увеличивается количество пека (71%).

При температуре паров около 200° в колбе образуется коксообразный пек, выделяется много газа и разгонка смолы прекращается. Разгонка непромытой смолы из-за перебросов затруднена, чего нельзя сказать о разгонке промытой смолы.

Средний выход продуктов от веса абс. сух. щепы за несколько лет работы Амзинской ГГУ составляет (в %): суммарной смолы 12,5, летучих кислот (в пересчете на уксусную) 5,5, древесного спирта 1,5.

Выходы смолы на Амзинской ГГУ в течение ряда лет были не устойчивы. Кроме того, из-за нарушения гидравлического режима работы установки наблюдались утечки газа из газогенератора в сушилку, а следовательно, потери продуктов пиролиза древесины.

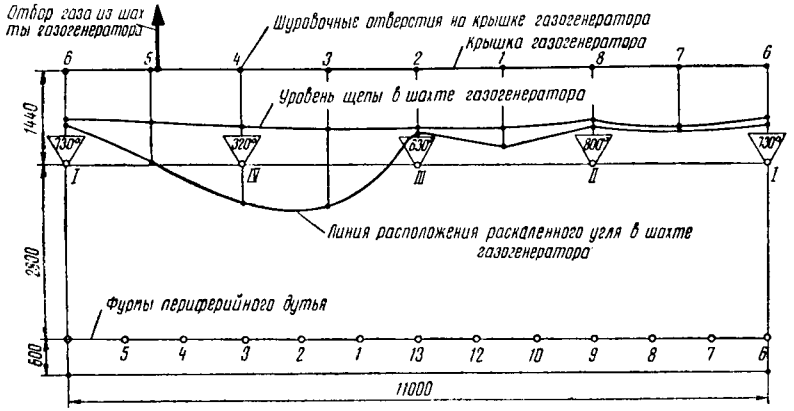


Рис. 63. Распределение уровня щепы и раскаленного слоя древесного угля по высоте и сечению газогенератора (условная развертка шахты газогенератора):

I, *II*, *III* и *IV* — температуры топлива в шахте газогенератора в четырех точках на высоте 2800 *мм* над фурмами дутья

Заметное влияние на выход продуктов (смол) оказывает неравномерное распределение дутья и температуры в слое топлива, находящегося в шахте газогенератора, что видно из специальных исследований и статистического производственного материала.

Неправильное распределение дутья по сечению шахты, а также неравномерность «хода» газогенератора наблюдаются при газификации других твердых топлив. Иногда нарушение температурного режима слоя топлива выражается в однобоком (неодинаковом по высоте) расположении раскаленной зоны. При этом наблюдаются «холодные» вкрапления топлива, расположенные в толще раскаленного угля [10].

Одной из причин появления указанных нарушений является наличие в топливе мелочи, неравномерно распределяющейся по всей массе газифицируемого материала. Мелочь, случайно сконцентрированная в отдельных точках слоя, препятствует пронизыванию газом мест скопления мелких фракций, что приводит к локальному и иногда затянувшемуся по времени охлаждению слоя.

Случайное шлакование отверстий дутьевых устройств может нарушить подачу воздуха в газогенератор, а следовательно, вызвать неравномерную газификацию топлива по сечению шахты. Для характеристики неравномерности «хода» газогенератора на рис. 63 приводятся результаты одного из испытаний Амзинского газогенератора. На рисунке показана развертка шахты газогенератора, которая для наглядности условно изображена в виде прямоугольника (конусность шахты не учтена).

Уровень топлива расположен примерно одинаково по всему сечению газогенератора и находится над фурмами на высоте 3320 *мм*. Расположение раскаленного слоя угля и температура в слое распределяются неравномерно. Надо отметить, что подобная неравномерность долгое время наблюдалась при эксплуатации газогенератора.

Пиролиз щепы в значительной части сечения газогенератора протекает в тонком слое 40—100 *мм* и только в одной четверти шахты (у точки *IV*) слой щепы достигает 600—1200 *мм*. На основании проведенных замеров видно, что общее количество топлива в газогенераторе составляет примерно 25—26 *нас. м*^{3}, из них около 15—16 *нас. м*^{3} раскаленного угля, т. е. примерно 60%.

Чрезвычайно высокий слой раскаленного угля в шахте и высокие температуры топлива (точки *I*, *II* и *III*) могут вызвать выход на поверхность слоя щепы высокотемпературного газа при одновременном выходе из слоя щепы (около точки *IV*) относительно низкотемпературного газа, содержащего жидкие и парообразные продукты. При смешивани этих двух газов происходит крекинг некоторых жидких недостаточно термостойких продуктов (например, растворимой смолы). Кроме того, при выходе высокотемпературного газа из слоя топлива без достаточного пронизывания щепы ухудшается газовый контакт, что снижает выход жидких продуктов с малой упругостью паров (например, веществ входящих в понятие «смола»). При более плохом газовом контакте уменьшается скорость нагрева, а следовательно, пиролиза щепы, что также приводит к снижению выхода жидких продуктов. Поэтому для повышения выходов смолы и других жидких продуктов необходимо стремиться к понижению температуры газа, выходящего из слоя щепы, равномерному распределению раскаленного слоя угля по сечению шахты, увеличению слоя щепы до оптимальных размеров в верхней части шахты газогенератора. Для этого необходимо равномерно распределять дутье по сечению газогенератора путем регулирования подачи воздуха через фурмы в зависимости от температуры в слое топлива, понижать температуру раскаленной зоны газогенератора путем увеличения присадки пара к воздуху. При работе газогенератора на сухой и подогретой щепе можно рекомендовать температуру паровоздушного дутья 65—70°. При работе на сырой щепе температура дутья должна быть снижена до 50—55°.

Степень неравномерности распределения температуры в слое по сечению газогенератора определяем из следующего уравнения:

$$\Delta t_m = \frac{(t_1 - t_{\min}) + (t_2 - t_{\min}) + (t_3 - t_{\min})}{n},$$

где:

Δt_m — степень неравномерности распределения температур в газогенераторе, т. е. в точках расположения термопар, установленных в шахте на уровне 2800 *мм* над дутьевыми фурмами, °С;

$t_{\min}$ — самая низкая температура в одной из точек, °С;

t_1; t_2; t_3 — температура в точках *I*, *II* и *III*, °С;

n — число точек для замера температур (в данном случае четыре).

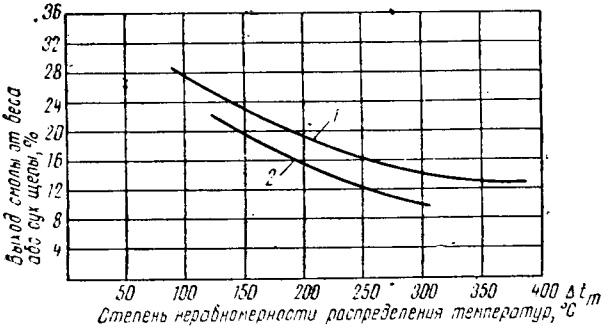


Рис. 64. Выход смолы в зависимости от степени неравномерности распределения температур Δt_m в шахте газогенератора:

1 — на основании специальных испытаний газогенератора;
2 — на основании производственных (статистических) данных

На рис. 64 приведена зависимость выхода смолы от степени неравномерности распределения температур в слое щепы, находящейся в шахте газогенератора. Как видно из рисунка, выход смолы от веса абс. сух. щепы изменялся от 12,6 до 28% (данные специальных опытов), а в обычных производственных условиях от 9,7 до 22%.

Равномерное распределение воздуха по сечению газогенератора является решающим условием для достижения одинаковых температур в слое топлива, находящегося в шахте.

При работе Амзинской ГГУ давление замеряется в точках, показанных на рис. 65. Из табл. 134 видно, что регулировочная задвижка, установленная у вентилятора, бесполезно поглощает 59—88% всего напора, создаваемого дутьевым вентилятором. Между тем известно, что регулирование расхода газов и жидкостей задвижками, вентилями и другими приборами происходит легко и

надежно в том случае, если сопротивление полностью открытого регулирующего органа в 2—3 раза будет превышать сопротивление объекта регулирования и системы трубопроводов. Иначе говоря, для удовлетворительного регулирования воздуха по сечению газогенератора необходимо установить регулирующие органы в непосредственной близости от газогенератора (у каждой

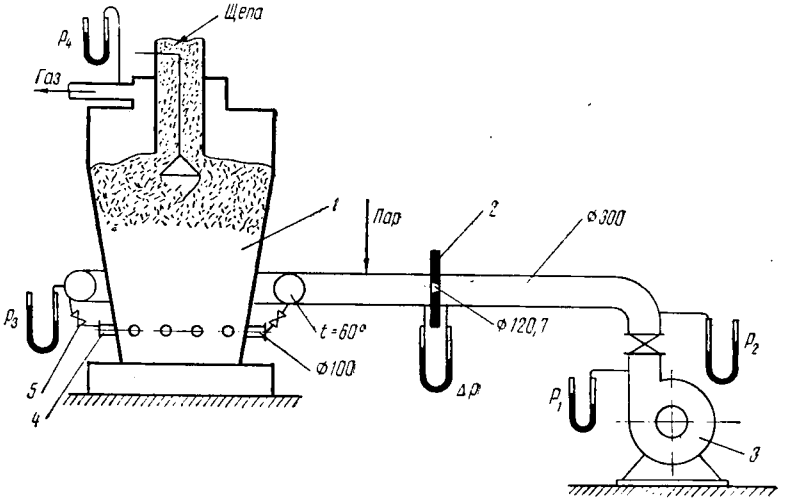


Рис. 65. Схема расположения точек для измерения давления по воздушно-газовому тракту Амзинского газогенератора:

1 — газогенератор; *2* — дроссельная диафрагма; *3* — воздуходувка; *4* — фурмы периферийного дутья; *5* — задвижка у фурм диаметром 100 *мм*; p_1 — давление, развиваемое воздуходувкой, *мм* вод. ст.; p_2 — давление после регулировочной задвижки вентилятора, *мм* вод. ст.; p_3 — давление в кольцевом коллекторе периферийного дутья, *мм* вод. ст.; p_4 — давление газа на выходе из газогенератора, *мм* вод. ст.; Δp — перепад давления у дроссельного прибора

Таблица 134

Распределение напора, развиваемого воздуходувкой, обеспечивающей газогенератор воздухом

Опыт	Напор, развиваемый воздуходувкой, *мм* вод. ст.	Сопротивление, *мм* вод. ст.			расход дутья, *кг/ч*
		регулировочной задвижки $p_1 - p_2$	воздухопровода и диафрагмы $p_2 - p_3$	слоя топлива в газогенераторе, задвижки и фурмы $p_3 - p_4$	
1	340 (100%)	340 — 140 = 200 (59%)	140 — 96 = 44 (13%)	96 — 10 = 86 (25%)	1252
2	340 (100%)	340 — 85 = 255 (75%)	85 — 58 = 27 (8%)	58 — 12 = 46 (13%)	989
3	340 (100%)	340 — 40 = 300 (88%)	40 — 36 = 4 (1%)	36 — 10 = 26 (8%)	422

фурмы). Для этого целесообразно регулировать дутье вентилями с большим сопротивлением, а задвижку у воздуходувки во время работы газогенератора открыть полностью. В этом случае напор, развиваемый воздуходувкой, будет использован для распределения воздуха по фурмам, а следовательно, и по сечению газогенератора.

На рис. 66 представлена рациональная схема подвода дутья к газогенератору с возможностью четкого регулирования воздуха,

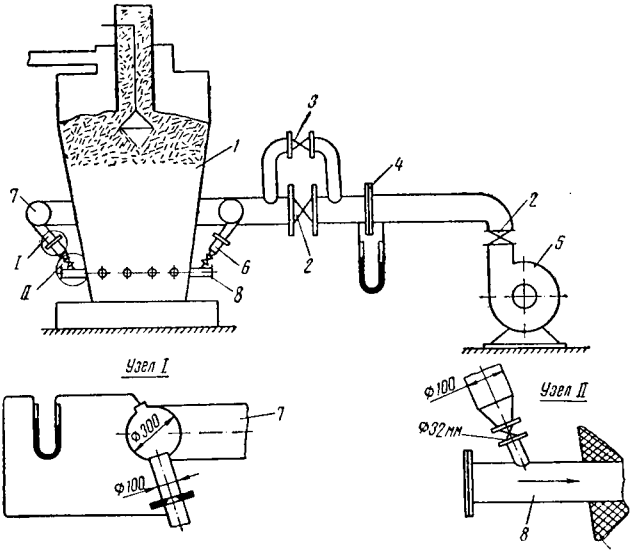


Рис. 66. Рекомендуемая схема подвода и регулировки дутья у газогенератора:

1 — газогенератор; *2* — задвижка диаметром 300 *мм*; *3* — задвижка диаметром 100 *мм*; *4* — дроссельная диафрагма; *5* — воздуходувка; *6* — подвод дутья к фурме; *7* — кольцо-коллектор для воздуха; *8* — фурма

подаваемого через фурмы в газогенератор. Каждая фурма должна быть снабжена регулировочным вентилем диаметром 32—36 *мм* вместо 100 *мм* и дроссельной диафрагмой с дифманометром. Диафрагмы служат для распределения дутья по сечению газогенератора, а не для его измерения. У каждой фурмы они должны быть строго одинаковыми.

Измерение воздуха необходимо производить дроссельным прибором на воздухопроводе — между воздуходувкой и газогенератором.

Рекомендуемая схема распределения дутья полностью себя оправдала. В настоящее время на Амзинской ГГУ обеспечивается постоянная высота раскаленного угля по сечению газогенератора. При этом достигнуто значительное постоянство выходов жидких продуктов при газификации щепы.

Средний состав и выход газа при газификации щепы за несколько лет приведены в табл. 135.

Количество переработанных дров на Амзинской ГГУ за 1961—1966 гг. приведено в табл. 136, из которой видно, что производительность газогенераторной установки далеко не достигла проектной.

Таблица 135

Выход газа и его состав на Амзинской ГГС

Выход газа от веса абс. сух. щепы, *нм³/кг*	Состав газа, объемные %							$Q_в$ *ккал/нм³*
	CO_2	CO	CH_4	H_2	C_nH_m	O_2	N_2	
1,15—1,86	5,3—9,3	21,3—29,8	1—2,8	11,8—16,8	0,1—0,5	0,2—1,0	41,5—54,9	1450—1550
Средние значения:								
1,63	7,3	25,5	1,23	14,9	0,2	0,52	49,35	1500

Таблица 136

Производительность Амзинской ГГС

Производительность по дровам	1961 г.	1962 г.	1963 г.	1964 г.	1965 г.	1966 г. (за 7 месяцев)
В тыс. *пл. м³*	12	11,1	13,9	14,5	12	10,8
В % от проекта	48	44,3	55,5	58,0	48	74,0

Существенным недостатком Амзинской ГГУ является то, что газогенератор примерно 1 раз в месяц останавливают из-за необходимости чистки холодильников и ремонта типового оборудования. Между тем газогенератор может работать без остановок по нескольку месяцев. Щепа, используемая для газификации, очень мелкая. Содержание мелочи, напоминающей опилки, составляет 20% и более. Присадка к этой щепе 10% опилок лесопильного завода не отразилась на работе газогенератора. Попытка газифицировать одни опилки не дала положительных результатов. При производительности газогенератора по щепе 60—70 *пл. м³/сутки* уноса с газом древесной мелочи и опилок из шахты в газопровод не наблюдалось. Поэтому гидрозатвор, предназначенный для удаления уноса из газопровода, через 3 года эксплуатации газогенератора был демонтирован из-за ненадобности.

Эксплуатация установки с применением электрофильтра. Схема, приведенная на рис. 67 отличалась от указанной ранее тем, что в качестве смолоотделителя был использован электрофильтр,

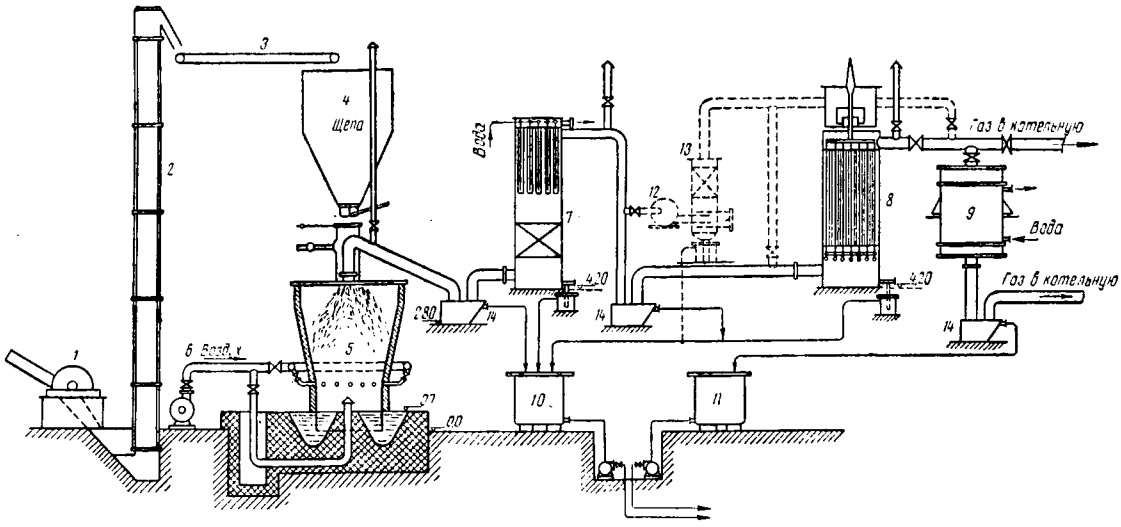


Рис. 67. 1-я схема Амзинской газогенераторной установки с электрофильтром:

1 — рубильная машина для дров; *2* — элеватор для щепы; *3* — пластинчатый питатель; *4* — бункер для щепы; *5* — газогенератор; *6* — воздуходувка; *7* — скруббер-холодильник; *8* — электрофильтр с деревянными осадительными электродами; *9* — конденсатор-холодильник; *10* — сборник расслаивающегося конденсата; *11* — сборник кислой воды (обессмоленной жижки); *12* — центробежный смолоотделитель, предусмотренный к установке; *13* — каплеулавливатель, предусмотренный к установке; *14* — гидрозатвор

а загрузка щепы в газогенератор производилась периодически при помощи загрузочной коробки объемом 4 $м^3$.

Отбор газа из газогенератора осуществлялся через две горловины, сходящиеся в один газопровод, соединенный с гидрозатвором *14*.

Для частичного охлаждения газ поступает в скруббер-холодильник *7*, внизу которого установлена хордовая насадка высотой 2000 *мм*, а вверху расположены вертикальные охладительные медные трубы с поверхностью охлаждения 42 $м^2$. Диаметр скруббера-холодильника 1600, высота 11 000 *мм*. Охлажденный газ через гидрозатвор направлялся в электрофильтр *8*.

Электрофильтр представлял собой стальной цилиндр, футерованный внутри деревом, в котором размещались деревянные прямоугольные осадительные электроды (25 шт.) из горизонтально расположенных досок в виде вертикальных колодцев размером 300×300 *мм*. Внутри каждого осадительного электрода по центру проходил коронирующий электрод в виде нихромовой проволоки диаметром 2,5 *мм*, укрепленный на стальной раме. Рама подвешена к фарфоровым изоляторам, расположенным в изоляторной коробке, которая отделена от камеры электрофильтра масляным гидрозатвором, заполненным трансформаторным маслом.

Электрическое питание электрофильтра производилось от агрегата АФ-18, состоящего из повысительного трансформатора, механического выпрямителя и других вспомогательных приборов. Напряжение, подаваемое на электрофильтр, 45—60 тыс. *в*, ток короны при этом равен 15—20 *ма*.

Обессмоленный газ из электрофильтра направлялся в трубчатый конденсатор-холодильник с поверхностью охлаждения 60 $м^2$, а затем в топки паровых котлов. Газ сжигали в топках в смеси с другими топливами (например, с дровами, углем и мазутом). В чистом виде сырой генераторный газ горит вполне устойчиво. Газ, выходящий из газогенератора, содержит 0,2—0,5% свободного кислорода, но возможны случайные подсосы воздуха в газовой магистрали.

Сжигание в топках сырого генераторного газа с содержанием 5% свободного кислорода безопасно.

Способ загрузки щепы в газогенератор при работе установки с электрофильтром несколько отличался от описанного ранее. Из бункера щепа поступала в загрузочную коробку.

Щепа из загрузочной коробки ссыпалась в газогенератор неравномерно, так как запорный конус при опускании отклонялся от оси (рис. 68). Неравномерность распределения щепы по сечению шахты сопровождалась однобокой газификацией топлива.

Запроектированный для газогенератора бункер емкостью 4 $м^3$ оказался мал. Поэтому объем его был увеличен до 27 $м^3$, что позволило останавливать рубильную машину на 3—4 *ч* для осмотра и смены ножей.

Для защиты от коррозии стальная аппаратура отфутерована досками по кошме и битуму следующим образом: на внутреннюю поверхность аппарата наносят слой разогретого битума 2—3 *мм*. На разогретый битум укладывают слой строительной кошмы толщиной 10—15 *мм*, а затем доски, которые укрепляют различными способами. При таком способе футеровки аппаратуры защитным слоем служит битум. Кошма предотвращает сползание битума вниз при размягчении его вследствие нагревания стенки горячим газом и конденсатами. Кроме того, кошма препятствует свободной циркуляции жидкости около стенки аппарата. Кошма поддерживается на стенках аппаратов дисками, поэтому между ними допускается небольшая неплотность. Применение вместо кошмы шлаковаты не оправдало себя, так как шлаковата растворяется в жижке.

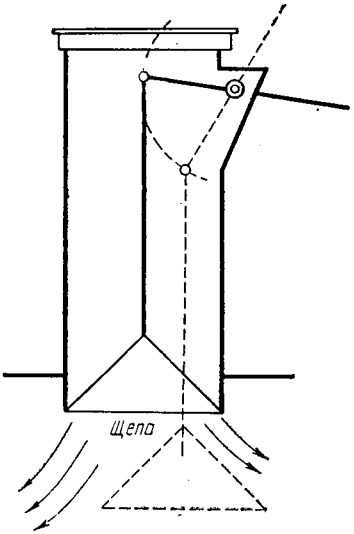


Рис. 68. Схема периодической загрузки щепы в газогенератор при помощи загрузочной коробки

Испытание Амзинской ГГУ производилось по двум схемам.

1-я схема (см рис. 67). Газогенераторная установка испытывалась при включенном скруббере-холодильнике. При этом газ частично охлаждался (до температуры 58—59°) при помощи вертикальных медных охладительных труб.

После скруббера-холодильника генераторный газ обессмоливался в электрофильтре.

2-я схема (рис. 69). Газ из газогенератора, минуя скруббер-холодильник (т. е. без предварительного охлаждения), поступал в электрофильтр. Температура газа перед электрофильтром была 76—78°. Обессмоленный газ поступал в конденсатор-холодильник. Конденсат из электрофильтра получался нерасслаивающимся. Конденсат из конденсатора-холодильника представлял собой прозрачную жидкость желтоватого цвета.

Перерабатываемая древесина учитывалась по числу загрузок щепы, производимых за опыт.

В загрузочную коробку вмещалось 4 *нас. м*^{3} щепы, что соответствовало 624 *кг* абс. сух. древесины.

Использованные для опытов осиновые дрова длиной 1 *м* были сильно поражены гнилью и содержали (в %): коры 8, гнили 56, древесины 36. Средневзвешенный размер щепы 3,6 *мм*. Содержание абс. сух. древесины в щепе 156 *кг/нас. м*^{3}. Относитель-

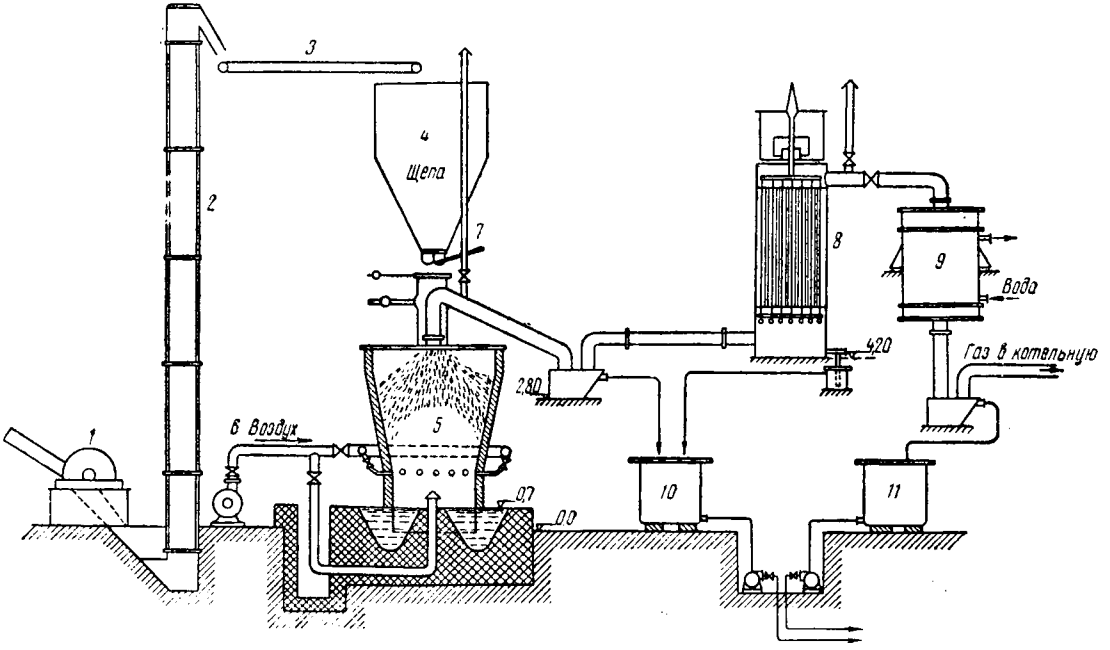


Рис. 69. 2-я схема Амзинской газогенераторной установки с электрофильтром:

1 — рубильная машина для дров; *2* — элеватор; *3* — пластинчатый питатель; *4* — бункер для щепы; *5* — газогенератор; *6* — воздуходувка; *7* — затвор для щепы; *8* — электрофильтр с деревянными осадительными электродами; *9* — конденсатор-холодильник; *10* — сборник конденсата; *11* — сборник кислой воды

ная влажность щепы 22,3—26,4%. Химический состав щепы (в %): целлюлозы по азотно-спиртовому методу 40,8; лигнина по сернокислотному методу 24,2; пентозанов 19,0; уроновых кислот 3,5; веществ, растворимых в горячей воде, 5,8; веществ, растворимых в эфире, 2,8; веществ, растворимых в спирто-бензольной смеси, 6,9; метоксильных групп ($—OCH_3$) 5,2; золы 0,91.

Повышенное содержание гнили повлияло и на химический состав древесины. Так, содержание целлюлозы, пентозанов и полиуроновых кислот было ниже, а лигнина и веществ, экстрагируемых водой и органическими растворителями, выше чем в обычной осиновой древесине [23], [24].

Таблица 137

Показатели испытания ГГУ при обессмоливании газа электрофильтром

Показатели	Опыт		
	1	2	3
Схема работы ГГУ	2-я	2-я	1-я
Продолжительность опыта, *ч*	46,5	48,5	45
Относительная влажность щепы, %	23,8	22,3	26,4
Количество дров, *пл. м*³	227	146	167
Интенсивность газификации на уровне периферийного дутья по абс. сух. щепе, *кг/м*²·*ч*	630	390	490
Выход суммарного конденсата в пересчете на дрова, *кг/пл. м*³	258 (100%)	328 (100%)	245 (100%)
В том числе:			
из электрофильтра и газопроводов	95 (37%)	117 (36%)	245
из конденсатора-холодильника	163 (63%)	211 (64%)	
Состав конденсата из электрофильтра и газопроводов, %:			
всплывные масла	Нерасслаивающийся конденсат		4
осадочная смола			17
жижка			79

В табл. 137 приведены основные исходные данные трех опытов. В двух первых в электрофильтре получался нерасслаивающийся конденсат, так как скруббер-холодильник не был включен. Газ поступал в электрофильтр по обводному газопроводу. В третьем опыте газ перед поступлением в электрофильтр охлаждался в скруббере-холодильнике, но конденсатор—холодильник был отключен.

Температура выходящего из газогенератора газа была 82—88°, т. е. значительно ниже, чем при работе газогенератора на

щепе, нагретой в сушилке. В данном случае поступающая в газогенератор щепа имела температуру около 10°. На участке газопровода генератор — электрофильтр, газ за счет теплопотерь охлаждался на 4—12°.

При охлаждении газа в скруббере-холодильнике температура газа понижалась на 27°. В конденсаторе-холодильнике температура очищенного в электрофильтре газа снижалась на 28—34°.

В третьем опыте газ из электрофильтра без охлаждения поступал в топку локомобиля САМПО-400, обеспечивая его работу на полную мощность.

Отдельные опыты показали, что воздух, поступающий в газогенератор, пересыщен парами воды на 12—20%.

Температура конденсатов из гидрозатвора была 64—69°, а из электрофильтра при работе его на неохлажденном газе, 66—70°. При работе электрофильтра на охлажденном газе температура этого конденсата была 50° (табл. 138).

Таблица 138

Температурный режим при обессмоливании газа электрофильтром (в °С)

Точка замера температуры	Опыты		
	1	2	3
Схема работы ГГУ	2-я	2-я	1-я
Газа:			
горловина газогенератора	82	88	83
до электрофильтра	78	76	56
после электрофильтра	76	72	55
после конденсатора-холодильника	48	38	—
Дутья:			
периферийного	43	40	46
центрального	46	43	47
Конденсатов:			
из гидрозатворов у газогенератора	64	69	—
из электрофильтра	70	66	50
из конденсатора-холодильника	48	38	—

По данным табл. 139 давление дутья в зависимости от производительности газогенератора изменялось от 280—320 до 120—150 *мм* вод. ст. Из таблицы видно, что слой щепы в газогенераторе, дутьевые устройства и зола создавали сопротивление 180—220 *мм* вод. ст. при повышенной производительности газогенератора (630 *кг/м²·ч* — опыт 1) и 45—55 *мм* вод. ст. при работе газогенератора с меньшей производительностью (490—390 *кг/м²·ч* — опыт 3 и 2).

Давление газа в горловине газогенератора 80—100 *мм* вод. ст. Этот напор расходовался на преодоление гидравлического сопротивления газопровода (7—14 *мм* вод. ст.), электрофильтра (1—3 *мм* вод. ст.), конденсатора-холодильника (10—23 *мм* вод. ст.), газопровода очищенного газа и горелки перед топкой (60—66 *мм* вод. ст.).

Таблица 139

Гидравлический режим работы установки по различным схемам с электрофильтром (в *мм* вод. ст.)

Точка замера давления	Опыты		
	1	2	3
Схема работы ГГУ	2-я	2-я	1-я
Дутья:			
периферийное	280	150	125
центральное	320	120	125
Газа:			
горловины газогенератора	100	80	80
перед электрофильтром	86	74	77
после электрофильтра	83	73	76
после конденсатора-холодильника	62	60	66

Как видно из табл. 139, перемещение газа по системе аппаратов при работе с электрофильтром осуществлялось за счет напора, создаваемого воздуходувкой, подающей дутье в газогенератор.

При работе ГГУ с центробежным смолоотделителем напор воздуходувки расходовался в основном для преодоления гидравлического сопротивления слоя щепы, золы и дутьевых устройств. Гидравлическое сопротивление газоочистной аппаратуры и газопроводов в этом случае преодолевался напором, создаваемым центробежным смолоотделителем.

Режим выгреба золы (очаговых остатков) из газогенератора за первый год его эксплуатации не был отработан, особенно при применении центрального дутья.

Влажность выгребаемой золы была 56—61%. Содержание минеральной части в пересчете на абс. сух. навеску 38—42%. Количество очаговых остатков от веса абс. сух. щепы 2—3%.

Потери угля, содержащегося в очаговых остатках, от веса абс. сух. щепы составляли 1,3—1,8%. За последнее время выгреб золы из газогенератора успешно осваивается и потери угля практически отсутствуют. Однако выгреб золы, например, из зольной чаши газогенератора системы проф. Пильника невозможен. Это происходит потому, что древесная зола из-за неправильной конфигурации чаши не сползает к фартуку.

На рис. 70 показаны профили чаш, из которых видна разница в устройстве этой важной детали газогенераторов.

Из табл. 140 видно, что конденсат из электрофильтра в опытах 1 и 2 получался нерасслаивающимся с влажностью 21,2—22,5%. Содержание летучих кислот (в пересчете на уксусную) 8,8—9,4%. Жижка в конденсаторе-холодильнике, полученная из обессмоленного газа, не содержала отстойной смолы. Конденсат был слегка мутный. Содержание растворимой смолы ничтожное (0,7—0,95%). Эти данные указывают на то, что в электрофильтре происходит вполне удовлетворительное обессмоливание генераторного газа.

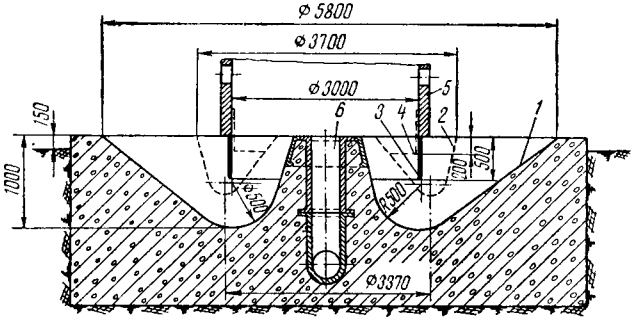


Рис. 70. Сравнительный профиль зольных чаш Амзинского газогенератора и газогенератора конструкции проф. Пильника:

1 — профиль чаши Амзинского газогенератора; *2* — профиль чаши газогенератора конструкции проф Пильника; *3* — фартук Амзинского газогенератора; *4* — фартук газогенератора конструкции проф. Пильника; *5* — стенка шахты газогенератора; *6* — воздухопровод центрального дутья

Конденсат, вытекающий из электрофильтра, при работе на охлажденном газе имел температуру 50—51° и получался расслаивающимся.

Всплывная и осадочная смолы по составу были близки между собой: влажность 19—21%, а летучих кислот (в пересчете на уксусную) 7%. Жижка из электрофильтра была высокосмолистой — 19,7%, летучих кислот содержалось 10,2. В отстойной смоле содержание легколетучих нейтральных продуктов (спиртов, эфиров и др.) было больше, чем в жижке. В этом случае сказалось влияние высокой сорбционной способности отстойной смолы к указанным продуктам.

Состав газа при работе ГГУ вполне удовлетворительный (табл. 141). Содержание в газе окиси углерода CO достигает 31,1—34,4%. Эти данные указывают на то, что в раскаленной зоне газогенератора развиваются высокие температуры, хотя температура газа в горловине небольшая (82—88°). Низкая темпера-

Таблица 140

Анализ конденсатов, полученных при работе ГГУ с электрофильтром

Конденсат	Опыт	Удельный вес при 20°	Содержание, %						
			летучих кислот (в пересчете на уксусную)	метилового спирта	эфира (в пересчете на метил-ацетат)	кетонов (в пересчете на ацетон)	альдегидов (в пересчете на формальдегид)	растворимой смолы	воды
Из электрофильтра									
Нерасслаивающийся конденсат	1	1,162	9,4	—	—	—	—	—	22,5
Нерасслаивающийся конденсат	2	1,152	8,8	—	—	—	—	—	21,2
Жижка	3	1,087	10,2	0,43	0,35	0,93	0,28	19,70	—
Отстойная смола	3	1,123	7,0	0,66	0,47	1,36	1,82	—	21,0
Всплывная смола	3	1,040	7,0	—	—	—	—	—	19,0
Из конденсатора-холодильника									
Жижка	1	1,022	6,7	0,96	—	—	—	0,95	—
Жижка	2	1,045	6,05	0,88	—	—	—	0,70	—

Таблица 141

Состав газа и содержание в нем конденсируемых продуктов после его очистки и охлаждения

Составные части газа	Опыты		
	1	2	3
Состав неконденсируемого газа в объемных %:			
CO_2	5,60	5,46	6,58
CO	31,10	34,40	31,40
CH_4	3,32	2,48	2,21
C_nH_m	0,30	0,23	0,29
H_2	14,30	12,60	15,90
O_2	0,31	0,43	0,41
N_2	45,07	44,40	43,21
Содержание конденсируемой части в газе, поступающем в топку локомобиля (в пересчете на сухой газ), *г/нм*³	82,0	73,0	160,0
В том числе:			
летучих кислот (в пересчете на уксусную)	6,64	4,80	5,20
метилового спирта	0,63	0,98	0,80
растворимой смолы	1,11	1,02	0,85
других органических веществ	1,52	4,10	4,10
воды	72,10	62,10	139,5

тура выходящего газа объясняется тем, что в газогенератор поступала холодная щепа (около 10°).

В газе, выходящем из конденсатора-холодильника, содержится 73—160 *г/нм*³ конденсируемых продуктов, а органических веществ в них 10—12%. Благодаря этому влага, поступавшая вместе с газом в топку, снижает теплоту сгорания сырого газа примерно на 100 *ккал/м*³, т. е. всего лишь на 5—6%. Поэтому сырой обессмоленный генераторный газ сгорает в топках вполне устойчиво.

В табл. 142 приведены основные результаты испытания газогенератора. Выход газа изменялся от 1,09 до 1,31 *нм*³/*кг* и зависел от производительности газогенератора. Выход жидких продуктов с повышением производительности газогенератора падал.

Таблица 142

Испытание газогенератора при разной производительности

Показатели	Опыт		
	1	2	3
Производительность газогенератора по абс. сух. щепе, *кг/ч*	2000 (100%)	1220 (61%)	1500 (75%)
Выход газа в пересчете на абс. сух. щепу, *нм*³/*кг*	1,31	1,09	1,13
Расход воздуха в пересчете на абс. сух. щепу, *нм*³/*кг*	0,75	0,615	0,572
Расход водяного пара на дутье в пересчете на абс. сух. щепу, *г/кг*	66	45	40
Выход жидких органических продуктов от веса абс. сух. щепы по горловине газогенератора, %	23,3	30,2	28,8
В том числе:			
летучих кислот (в пересчете на уксусную)	5,74	6,22	6,62
метилового спирта	0,69	0,67	0,73
растворимой смолы	9,27	11,60	9,40
отстойной смолы	7,15	9,15	10,90
других органических веществ	0,45	2,56	1,15
Тепловой к. п. д. газогенератора, %:			
по газу	48	39	41
по жидким продуктам	33	38	36

Тепловой к. п. д. газогенератора по газу с повышением производительности газогенератора по щепе возрастал, а к. п. д. по жидким продуктам одновременно снижался.

Проектная производительность газогенератора Амзинской ГГУ по абс. сух. щепе 1300 *кг/ч*. В опыте 1 производительность была выше проектной на 54%, а в опытах 2 и 3 приближалась

к проектной (94 и 115%). Исходя из этого можно рекомендовать для увеличения удельных выходов жидких продуктов не форсировать газогенератор выше оптимальной производительности.

При температуре газа перед электрофильтром 78° степень улавливания смолы достигала 97% (табл. 143). С понижением

Таблица 143

Распределение жидких продуктов газа по аппаратам при работе ГГУ с электрофильтром

Показатели	Опыт		
	1	2	3
Температура газа, °С			
до электрофильтра	78	76	56
после электрофильтра	76	72	55
Степень улавливания из газа в электрофильтре, газопроводах и скруббере-холодильнике, %:			
летучих кислот (в пересчете на уксусную)	38	41	87
метилового спирта	33	36	39
смолы	97	98	99,3
воды	10	11	69
Температура газа после конденсатора-холодильника, °С	48	38	—
Доулавливание из газа в конденсаторе-холодильнике, %:			
летучих кислот (в пересчете на уксусную)	47	51	—
метилового спирта	55	48	—
смолы	1,5	1	—
воды	71	78	—
Потери жидких продуктов с газом, поступающим в топку, %:			
летучих кислот (в пересчете на уксусную)	15	8	13
метилового спирта	12	16	61
смолы	1,5	1	0,7
воды	19	11	31

температуры улавливание жидких продуктов увеличивалось до 98—99,3%. Следует обратить внимание на соотношение между количеством осаждаемых органических продуктов и воды. Так, при температуре 76—78° смола улавливается почти полностью, а вода всего лишь на 10—11%. Происходит как бы обезвоживание смолы при помощи электрофильтра. Летучие кислоты и ней-

тральные вещества (например, метиловый спирт) улавливаются при указанных температурах примерно на 35—40%.

При понижении температуры до 56° количество летучих кислот, извлекаемых электрофильтром из газа, почти удваивалось (87%).

Газ из электрофильтра поступал в конденсатор-холодильник, где происходило дополнительное выделение летучих кислот (47—51%) и нейтральных продуктов, например метилового спирта (48—55%). Здесь же выпадало основное количество воды (71—78%).

Общее количество улавливаемых жидких органических продуктов при температуре в электрофильтре 72—78° и конденсаторе-холодильнике 38—48° составляло: летучих кислот (в пересчете на уксусную) 85—92%, метилового спирта 84—88% и смолы 98,5—99%.

Если при газификации осиновой щепы влажностью 20—25% будут получать только нерасслаивающийся конденсат (в электрофильтре), то степень улавливания по смоле может достичь 97—98%, по летучим кислотам 38—41% и по метиловому спирту 33—36%. При этом влажность нерасслаивающегося конденсата будет составлять около 20%, а содержание летучих кислот (в пересчете на уксусную) около 9%.

При работе газогенератора с электрофильтром значительно возрастает степень выделения смолы (98%) по сравнению с центробежным смолоотделителем (84%), а также увеличивается степень выделения летучих кислот и спиртов (табл. 144). При работе ГГУ с электрофильтром на увеличение степени улавливания летучих продуктов оказывает влияние не только сорбционное свойство смолы, но и электрическое поле коронного разряда.

Таблица 144

Степень улавливания жидких продуктов из газа при применении различных смолоотделителей

Тип смолоотделителя	Температура газа, °С	Коэффициент выделения из газа, %			
		смолы	летучих кислот	метилового спирта и др.	воды
Электрофильтр	75	98	40	34	10
Центробежный	76	84	32	16	11

Эксплуатация установки с барабанной сушилкой для щепы. В дальнейшем технологическая схема производства, представленная на рис. 62, подверглась изменению в направлении сушки и подачи щепы в газогенератор (рис. 71). Шнековая сушилка заменена барабанной, смонтированной вне здания на нулевой отметке.

Барабан сушилки имеет диаметр 2200 *мм* и длину 10 000 *мм*. Для снижения потерь тепла барабан в доступных местах снабжен теплоизоляцией из шлаковаты, которая защищена от атмосферных осадков металлическим кожухом. Толщина изоляционного слоя 120—150 *мм*.

Предназначенная для газификации щепа находится в прямоугольном бункере *1*, в низу которого расположен транспортер *2*. Бункер заполняется сырой щепой от рубильной машины *3* элеватором *4* или самосвалами, доставляющими щепу из леспромхоза. Элеватором *5* щепа непрерывно загружается в барабанную сушилку *6*. Теплоносителем служат дымовые газы от специальной топки-смесителя *7*, где сжигается сырой генераторный газ. Понижение температуры теплоносителя производится путем разбавления его воздухом. Поэтому содержание свободного кислорода в дымовом газе перед сушилкой достигает 6—10%. Щепа и теплоноситель движутся по барабану параллельно. Отсасывается теплоноситель газодувкой *8*. Сухая щепа из сушилки ссыпается в эжекционное устройство *9*, а затем по пневмотрубе *10* попадает в сепаратор *11* и бункер *12*, установленный над газогенератором. Благодаря подсосу воздуха через сальниковое устройство неподвижных камер, расположенных до и после сушильного барабана, содержание свободного кислорода в отработавшем теплоносителе повышается до 14—16%. Сепаратор *11* представляет собой сдвоенные циклоны, расположенные один в другом. Полнота отделения от газа древесной мелочи и пыли высокая. Пыль от щепы не отделяется и, попадая в газогенератор, является причиной частого забивания горловины уносами. Из бункера *12* щепа шнековым питателем *13* подается в газогенератор *14*.

Механизмы новой системы подготовки и подачи щепы работают удовлетворительно.

Производственные показатели работы сушилки следующие: при производительности барабанной сушилки по щепе 6—7 *нас. м*^{3}/*ч* удельный влагосъем равен 15—20 *кг*/*м*^{3} · *ч*. При этом относительная влажность щепы снижается от 45—50% до 15—25%. Температура теплоносителя до сушилки 450—500°, а после 110—130°. Сухая щепа, поступающая из бункера *12* в газогенератор, обычно имеет температуру 55—60°. Относительно низкая удельная производительность барабанной сушилки объясняется тем, что мощность сушильного агрегата не соответствует производительности газогенератора.

6. ЛАБОРАТОРНЫЕ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ДАННЫЕ О ПЕРЕРАБОТКЕ ГАЗОГЕНЕРАТОРНЫХ КОНДЕНСАТОВ

Для определения возможности использования газогенераторных конденсатов в химическом цехе завода, перерабатывающем продукты пиролиза древесины в вертикальных ретортах, были

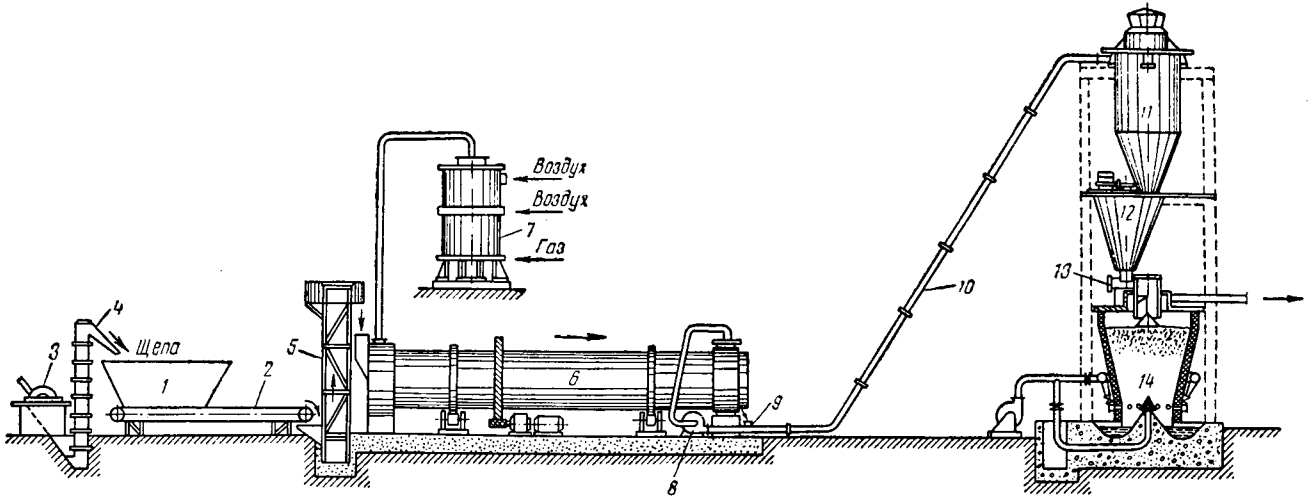


Рис. 71. Схема расположения барабанной сушилки на Амзинской ГГУ:

1 — прямоугольный бункер для сырой щепы; *2* — транспортер для разгрузки бункера; *3* — рубильная машина; *4* — элеватор для загрузки сырой щепы в бункер; *5* — элеватор для подачи сырой щепы в сушилку; *6* — барабанная сушилка; *7* — топка-смеситель для сжигания генераторного газа с целью получения теплоносителя; *8* — газодувка пневмотранспортного устройства; *9* — эжектор; *10* — пневмотруба; *11* — сдвоенный циклон; *12* — бункер для сухой щепы; *13* — шнековый питатель для щепы; *14* — газогенератор

проведены лабораторные исследования по экстракции газогенераторной жижки этилацетатом.

Лабораторные опыты экстракции газогенераторной жижки этилацетатом. Для проведения опытов использовались березовая газогенераторная жижка из газогенераторной установки ЛТА, амзинская производственная сухоперегонная обесспиртованная жижка и смесь их в весовом отношении 1 : 1. Характеристика сырья приведена в табл. 145.

Таблица 145

Анализ газогенераторной и сухоперегонной жижки

Образец жижки	Летучие кислоты (в пересчете на уксусную), %	Растворимая смола, %	Метиловый спирт, %	Удельный вес при 20°
Амзинская сухоперегонная обесспиртованная	9,4	6,9	0,33	1,039
Газогенераторная с установки ЛТА	14,6	30,0	0,91	1,126
Смесь 1 : 1	12,2	19,0	0,69	1,087

Экстракция уксусной кислоты производилась в лабораторной непрерывно действующей установке. Экстрактором служила стеклянная трубка длиной 1800 *мм*, диаметром 28 *мм*, набитая мелким стеклом с частицами размером от 1 до 3 *мм*. Высота слоя жижки в экстракторе во время опытов равнялась примерно 1200 *мм*. Количество подаваемой в экстрактор жижки 1 *мл/мин*, а эфира 3 *мл/мин* [49].

В табл. 146 наглядно показано влияние происхождения жижки на степень растворимости в эфире ее составных частей. Газогенераторной жижки растворялось в этилацетате 61%, а сухоперегонной почти в 2 раза меньше (34%). Растворимость смеси занимала практически среднее положение.

Содержание в эфирокислоте основных составляющих жижки приведено в табл. 147.

Характеристика отработанной жижки и черной кислоты приведена в табл. 148.

Кислотность отработанной жижки получалась выше, чем в производственной жижке Амзинского завода, которая обычно равна 0,4%. Очевидно, повышенное содержание растворимой смолы препятствует переходу кислоты в эфир, хотя относительная степень извлечения ее во всех опытах равнялась 95%.

Черная кислота, получаемая в химическом цехе Амзинского завода методом экстракции этилацетатом из необессмоленной

Таблица 146

Экстракция сухоперегонной и газогенераторной жижки этилацетатом

Показатели	Образец жижки		
	сухоперегонная амзинская обесспиртованная (опыт 1)	газогенераторная с установки ЛТА (опыт 2)	смесь 1 : 1 (опыт 3)
Количество использованной жижки, *г*	500 (100%)	1000 (100%)	1000 (100%)
Количество обработанной жижки, *г*	332 (66%)	390 (39%)	500 (50%)
Степень извлечения кислоты при экстракции, %	95	95	95
Степень растворения воды в эфире при экстракции, %	24	49	38
Степень извлечения растворимой смолы при экстракции, %	54,6	65	62

Таблица 147

Содержание в эфирокислоте веществ, извлеченных при экстракции жижки (в %)

Продукты, содержащиеся в эфирокислоте	Для сухоперегонной жижки	Для газогенераторной жижки	Для смеси 1:1
Летучие кислоты (в пересчете на уксусную)	3,4	5,2	4,4
Смола	1,4	7,4	4,4
Вода	7,5	9,9	9,6

Таблица 148

Анализ отработанной жижки после экстракции и черной кислоты после отгонки эфира

Опыт	Образцы жижки	Содержание в отработанной жижке			Содержание в черной кислоте		
		летучих кислот, %	растворимой смолы, %	удельный вес при 20°	летучих кислот, %	растворимой смолы, %	удельный вес при 20°
1	Сухоперегонная амзинская обесспиртованная	0,73	4,70	1,019	40,0	3,7	56,3
2	Газогенераторная с установки ЛТА	1,92	27,0	1,103	30,0	9,7	60,3
3	Смесь 1 : 1	1,20	14,4	1,056	30,2	9,6	60,2

жижки, по составу довольно близка к той, которая была получена на лабораторной установке. В лабораторных условиях заметно увеличено содержание смолы (3,7% вместо 1,2—1,5%) для производственной черной кислоты), что можно объяснить несовершенством лабораторных опытов.

Относительное понижение кислотности черной кислоты в опытах 1 и 2 объясняется главным образом тем, что по сравнению с сухоперегонной газогенераторная растворимая смола в значительно большем количестве переходит в эфирокислоту. Так, из опыта с газогенераторной жижкой видно, что на 1 часть летучих кислот, содержащихся в черной кислоте, приходится 2 части смолы. В черной кислоте, полученной из сухоперегонной жижки, на 1 часть летучих кислот приходится смолы значительно меньше — 1,4 части.

Состав растворенной в эфире части жижки для различных образцов различен (табл. 149).

Таблица 149

Состав веществ, растворившихся в этилацетате при экстракции жижки в (%)

Продукты, растворимые в этилацетате	Для сухоперегонной жижки	Для газогенераторной жижки	Для смеси 1:1
Летучие кислоты (в пересчете на уксусную)	26,2	22,7	23,4
Смола	11,1	31,2	23,6
Вода	62,7	46,1	53,0

Как видно, при экстракции газогенераторной жижки и смеси ее с сухоперегонной происходит значительное обогащение экстракта смолой вследствие того, что исходный экстрагируемый материал содержит большое количество растворимой смолы (19 и 30%). Повышенное содержание смолы в экстракте, видимо, является одной из причин, затрудняющих отгонку летучих кислот от черной кислоты.

Черная кислота во всех трех опытах разгонялась под вакуумом (600—620 *мм* рт. ст.) на фракции: кислоту-сырец и масла (см. табл. 150).

Проведенные исследования показали, что можно перерабатывать газогенераторную жижку в чистом виде и в смеси ее с сухоперегонной. Однако при экстракции повышается растворимость в экстрагенте воды и смолы жижки, что неизбежно приведет к изменению режима работы аппаратуры химического цеха завода.

Переработка газогенераторных конденсатов в химическом цехе Амзинского завода. В ретортном цехе завода для сухой перегонки древесины (чурки) применяется вертикальная реторта с внутренним обогревом. При пиролизе древесины в этой реторте, близком к процессу в шахте газогенератора, получается более

Таблица 150

Результаты вакуумразгонки черной кислоты, получаемой при экстракции различной жижки

Опыт	Образец жижки	Кислота-сырец, %	Масла, %	Пек, %	Кислотность кислоты-сырца, %
1	Сухоперегонная амзинская обесспиртованная	34,0	26,0	33,8	70,4
2	Газогенераторная с установки ЛТА	23,6	35,3	33,7	68,5
3	Смесь 1 : 1	35,3	28,3	33,0	62,0

смолистая жижка, чем на других сухоперегонных заводах, где применяются реторты с наружным нагревом.

В химическом цехе использован метод экстракции уксусной кислоты из необессмоленной жижки. Перед экстракцией отделяются только отстойная смола и всплывные масла, а растворимая смола, находящаяся в обесспиртованной жижке, поступает на экстракцию.

Добавка 30—60% газогенераторного смолистого конденсата к ретортной жижке и их совместная переработка по существующей технологии вызвала ряд затруднений. В условиях Амзинского завода работа обесспиртовывающего, эфирокислотного и чернокислотного аппаратов ухудшилась. Содержание спиртов в обесспиртовывающей жижке увеличилось до 0,4 вместо 0,1—0,2%. Температура в каландрии эфирокислотного аппарата вследствие засмоления снизилась со 150 до 125°. Содержание этилацетата в черной кислоте возросло до 2 вместо 0,5%. Кислотность черной кислоты уменьшилась с 45 до 35%. Кислотность технической уксусной кислоты, получаемой на чернокислотном аппарате, снизилась главным образом за счет воды и избыточного количества смолистых веществ с 82 до 65%. Большое содержание в газогенераторной смолистой жижке растворимой смолы способствовало увеличению содержания воды в эфирокислоте. Получалась более разбавленная техническая уксусная кислота. Поэтому процесс этерификации при получении этилацетата преждевременно прекращался. В кубах этерификаторов накапливалось очень много смолистых веществ, в результате чего приходилось останавливать аппарат на чистку через 80—100 *ч* вместо 250—300 *ч* при работе на чистой ретортной жижке.

При повышенном температурном режиме в смолоотделителе получается нерасслаивающийся конденсат, содержащий 20—25% воды и 9—11% летучих кислот. Это позволило направить нерасслаивающийся конденсат на смолообезвоживание совместно с сухоперегонной ретортной смолой, минуя экстракционную систему. Работа смолообезвоживающего аппарата в этом случае несколько

затрудняется из-за образования пека, что объясняется значительно бо́льшим содержанием растворимой смолы в газогенераторных продуктах.

Жижка и кислая вода, получаемые в конденсаторе-холодильнике и пенном аппарате, содержат до 5—7% летучих кислот, 1,5—

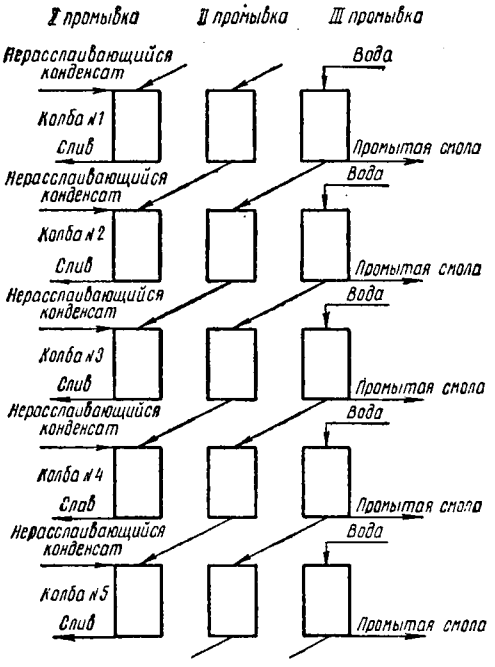


Рис. 72. Схема трехступенчатой промывки газогенераторного нерасслаивающегося конденсата

2% древесного спирта и только около 2% растворимой смолы. Эти конденсаты перерабатываются в смеси с ретортной жижкой в любых соотношениях без затруднений при эксплуатации оборудования химического цеха.

Ступенчатая промывка суммарной смолы горячей водой. Для отделения растворимой смолы от отстойной были проведены лабораторные исследования нерасслаивающегося конденсата путем многократных промывок его горячей водой (78—84°) по схеме, изображенной на рис. 72.

На первую промывку свежей пробы нерасслаивающегося конденсата заливалась вторая промывная вода; на вторую промывку в колбу заливалась первая промывная вода и на третью промывку заливалась в хвостовую колбу свежая вода. Устано-

вившийся процесс промывки наступал в пятой-шестой колбе. Промытая смола из хвостовых колб и промывные воды окончательного слива из головных колб собирались, начиная с пятой-шестой колбы.

Таблица 151

Исходные данные лабораторной промывки горячей водой нерасслаивающегося конденсата Амзинской ГГУ

Опыт	Число использованных колб	Количество загруженных в каждую колбу, г			Количество полученных из каждой колбы, г			Невязка, г
		конденсата	чистой воды	всего	промытой смолы	промывной воды	всего	
1	6	70 (100%)	100	170	24,2 (34,5%)	139	163,2	+6,8
2	7	70 (100%)	70	140	21,2 (30,3%)	116	137,2	+2,8
3	7	70 (100%)	50	120	21 (30%)	100	121,0	—1

Из табл. 151 видно, что в конечном итоге промывка нерасслаивающегося конденсата производилась чистой водой в следующих соотношениях: в опыте 1 на 100 частей конденсата при трехступенчатых промывках затрачивалось чистой воды 143 части, в опытах 2 и 3 соответственно 100 и 70 частей.

Промытой смолы от исходного смоляного конденсата в опыте 1 получалось 34,5%, а в опытах 2 и 3 соответственно 30,3 и 30%.

Содержание летучих кислот и воды в промытой смоле значительно ниже, чем в исходном нерасслаивающемся конденсате (табл. 152).

Таблица 152

Анализ смолы до и после промывки

Образцы смолы	Содержание летучих кислот, %	Влажность, %	Удельный вес при 20°
Нерасслаивающийся конденсат до промывки	9—10	21—27	1,15
Промытая смола	3—4	4—6	1,13

При расходе чистой воды в количестве 70% от исходного нерасслаивающегося конденсата в промывной воде содержалось 26% растворимой смолы (табл. 153).

На основании этих опытов рекомендован следующий режим ступенчатого разделения растворимой и нерастворимой смолы нерасслаивающегося конденсата:

1) промывка конденсата горячей водой при температуре 80°; 2) расход воды от исходного конденсата 70—80%; 3) промывка трехступенчатая.

Таблица 153

Количество и анализ промывной воды в зависимости от расхода чистой воды на промывку суммарной смолы

Расход чистой воды на промывку 100 частей нерасслаивающегося конденсата	Получено промывной воды при трехступенчатой промывке на 100 частей нерасслаивающегося конденсата	Анализ промывной воды:		
		летучие кислоты, %	растворимая смола, %	удельный вес при 20°
143	198	5	18	1,070
100	166	6	22	1,120
70	143	7	26	1,128

Изменение состава промывной воды при трехступенчатой промывке нерасслаивающегося конденсата представлено в табл. 154.

Таблица 154

Анализ промывной воды от каждой ступени промывки нерасслаивающегося конденсата

Опыт	Расход чистой воды на 100 частей нерасслаивающегося конденсата	Содержание в промывной воде, %					
		летучих кислот	растворимой смолы	летучих кислот	растворимой смолы	летучих кислот	растворимой смолы
		первая промывка		вторая промывка		третья промывка	
1	143	5	18	1,0	4	0,4	0,5
2	100	6	22	2,5	10	1,0	0,8
3	70	7	26	3,5	11	1,4	2,0

За третью промывку нерасслаивающегося конденсата в промывную воду переходит ничтожное количество кислоты и растворимой смолы, поэтому в ряде случаев трехступенчатую промывку конденсата можно заменить двухступенчатой.

Производственные данные о переработке сухоперегонной жижки и газогенераторного конденсата на Амзинском лесохимическом заводе. В течение ряда лет в химическом цехе Амзинского завода перерабатываются жидкие продукты газификации древесины совместно с ретортной жижкой. Качественные показатели работы аппаратуры химического цеха не снижаются, что видно при сравнении результатов двух опытов.

Таблица 155

Исходные данные переработки различных конденсатов в химическом цехе Амзинского завода

Опыт	Количество переработанных дров, *пл. м*³			Выход конденсатов в пересчете на дрова, *кг/пл. м*³			
	в реторте (береза)	в газогенераторе (осина)	всего	в ретортном цехе	на ГГУ	в том числе	
						обессмоленной жижки и кислой воды	нерасслаивающегося конденсата
1	2260 (64%)	1310 (36%)	3570 (100%)	336	269 (100%)	180 (67%)	89 (33%)
2	812 (100%)	—	812 (100%)	353	—	—	—

В опыте 1 перерабатывалась смесь продуктов пиролиза березовой древесины в вертикальной непрерывнодействующей реторте и газификации осиновой древесины (табл. 155). В опыте 2 перерабатывались только ретортные жидкие продукты (жижка) пиролиза березовой древесины.

Производительность химического цеха при работе его на смеси равнялась 58,6 *т/сутки*, а при работе цеха на чистой ретортной жижке 41 *т/сутки*. Эти данные указывают на то, что перевод цеха на смесь сухоперегонного и газогенераторного конденсатов не сказался отрицательно на работе оборудования. Исходное сырье химического цеха в опыте 1 содержало 33% газогенераторного обессмоленного конденсата и 67% сухоперегонной жижки. Эта смесь поступала на обесспиртовывание и экстракцию. Другая часть газогенераторного (нерасслаивающегося) конденсата поступала в смолообезвоживающий аппарат в смеси с отстойной сухоперегонной смолой. В табл. 156 приведены средние аналитические данные исходного сырья. Обессмоленная газогенераторная жижка содержала относительно мало кислот (6,7%). В газогенераторном нерасслаивающемся конденсате содержалось 10% кислот, т. е. почти столько же, сколько и в сухоперегонной жижке (10,8%). Летучие кислоты нерасслаивающегося смоляного конденсата после обработки его в смолообезвоживающем аппарате переходят в кислую воду, добавляемую к ретортной жижке.

В табл. 157 показано, что при переработке смеси газогенераторного и сухоперегонного конденсатов и только сухоперегонного конденсата получены близкие между собой результаты.

7. ВЕРХОВСКАЯ ГАЗОГЕНЕРАТОРНАЯ УСТАНОВКА

Верховская опытно-промышленная газогенераторная установка построена в 1963 г. и предназначена для изучения аппаратуры и процессов газификации при переработке отходов лесозаготовок. Преимущественным сырьем на установке являются отходы

Таблица 156

Анализ конденсатов, перерабатываемых в химическом цехе Амзинского завода

Показатели	Ретортная жижка	Газогенераторные конденсаты	
		обессмоленная жижка и кислая вода	нерасслаивающийся конденсат
Общая кислотность (в пересчете на уксусную), %	10,8	6,7	10
Растворимая смола, %	6,4	0,93	—
Влажность, %	—	—	20
Удельный вес при 20°	1,038	1,018	1,140

Таблица 157

Показатели работы химического цеха Амзинского завода на конденсатах различного происхождения

Показатели	Работа химического цеха на жижке	
	ретортной и обессмоленной газогенераторной	ретортной
Анализ обесспиртованной жижки:		
общая кислотность (в пересчете на уксусную), %	10,1	11,9
эфиры (в пересчете на метилацетат), %	0,17	0,08
удельный вес при 20°	1,044	1,047
Кислотность (в пересчете на уксусную), %:		
эфировода	0,51	0,61
оборотный эфир	0,072	0,082
кислая смола из чернокислотного аппарата	14,7	18,4
техническая кислота	92,7	92,4
Анализ кондиционной смолы, %:		
влажность	1,56	2,0
летучие кислоты (в пересчете на уксусную)	3,5	4,7
содержание легких масел	7,3	8,8
Анализ эфироводы, %:		
содержание растворимой смолы	2,1	3,2

хвойных пород(ель). Измельченные в рубильной машине ДУ-2 лесосечные отходы доставляются на склад сырья ГГУ. Склад представляет собой крытый деревянный сарай с расположенными в нем цепными транспортерами ТОЦ-16. Щепа на газификацию

может поступать со склада или непосредственно из вагонов (рис. 73).

Сырая щепа наклонным транспортером *1* подается в верхний барабан шнековой сушилки *2*. Теплоносителем служит дымовой газ, получаемый в топке-смесителе *12*, где сжигается сырой генераторный газ. Отработавшие дымовые газы, орошаемые водой, через пылевую камеру *3* выбрасываются в атмосферу. Теплоноситель при начальной температуре 350—600° поступает в барабан сушилки и передвигается в ней по схеме противотока (по отношению к щепе). Сухая щепа через затвор *5* непрерывно поступает в газогенератор *4*. Газ, выходящий из газогенератора по двум горловинам, направляется в гидрозатвор *6* и затем в оросительный скруббер *8*.

В горловине газогенератора и в скруббере производится непрерывное орошение газа циркулирующей жижкой, охлаждаемой в поверхностном холодильнике *7*. В центробежном смолоотделителе (ТГ-150-1,12) *9* и каплеулавливателе *10* происходит осаждение смолы. Все конденсаты собираются в сборниках *11*. Подача воздуха в газогенератор производится вентилятором среднего давления. Расход воздуха измеряется при помощи дроссельной диафрагмы *13*. Для увлажнения дутья применяется пар. Выгреб золы из газогенератора выполняется вручную [50].

Характерная особенность щепы из лесосечных отходов заключается в содержании до 30—40% хвои и древесной мелочи, что препятствует форсировке газогенератора. Несмотря на низкокачественное сырье, среднемесячная интенсивность газификации лесосечных отходов достигала 425 *кг/м*$^2 \cdot$ *ч*.

Выход сырой отстойной смолы (влажность 20% и кислотность 2—3%), например, за 1965 г. составил в среднем 35,5 *кг/пл. м*^{3} с колебаниями по месяцам от 23,7 до 45,2 *кг/пл. м*^{3}. Одной из основных причин значительного изменения удельного выхода смолы является неоднородный состав исходного сырья. Большое содержание хвои в щепе, достигающее 35%, заметно снижает общий выход смолы. Кроме хвои, в лесосечных отходах содержится большое количество коры (20% и более).

Работа двухбарабанной шнековой сушилки. Сушилка представляет собой два сушильных барабана, соединенных между собой последовательно. Барабаны расположены один над другим (рис. 74).

Внутренний диаметр сушильных барабанов 900 *мм*. Общая длина их равна 10150 *мм*, а рабочая длина 5350 *мм*. Рабочий объем шнековой сушилки 3,5 *м*^{3}. Сушильные барабаны изготовлены из листовой стали толщиной 10 *мм*. По длине барабанов расположены люки диаметром 270 *мм*. Снаружи сушильные барабаны имеют теплоизоляцию из асбестита толщиной 120 *мм* и шлаковаты толщиной 200 *мм*. Теплоизоляция защищена от атмосферных осадков железным кожухом.

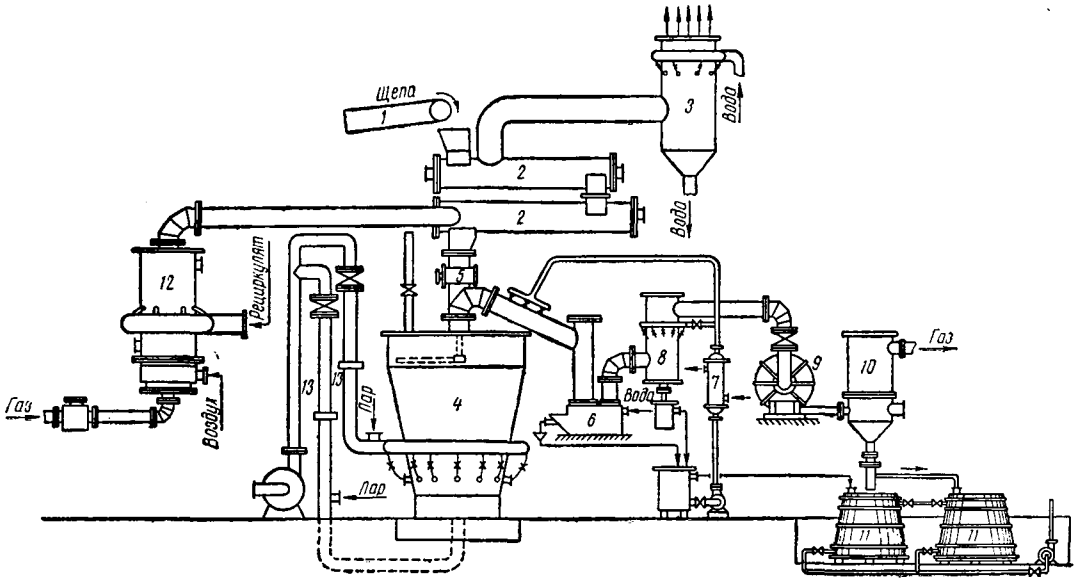


Рис. 73. Схема Верховской газогенераторной установки:

1 — транспортер для сырой щепы; *2* — шнековая двухбарабанная сушилка; *3* — камера для удаления пыли из отработавшего теплоносителя; *4* — газогенератор для лесосечных отходов; *5* — секторный затвор для щепы; *6* — гидрозатвор для газа; *7* — поверхностный холодильник; *8* — оросительный скруббер для охлаждения газа; *9* — центробежная газодувка-смолоотделитель; *10* — каплеулавливатель; *11* — сборники газогенераторных конденсатов и смолы; *12* — топка-смеситель для получения теплоносителя; *13* — дроссельная диафрагма для измерения расхода дутья

Для увеличения времени пребывания щепы в барабанах в конце каждого из них установлены перегородки. В результате заполнение сушилки щепой повысилось с 0,1—0,15 до 0,20—0,35, что значительно улучшило сушку щепы.

Температуру теплоносителя регулируют рециркуляцией отработавшего теплоносителя.

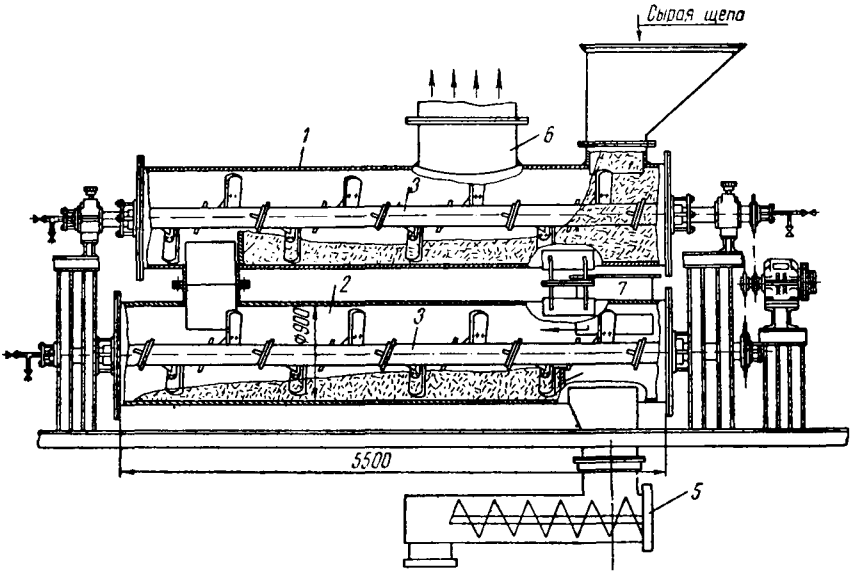


Рис. 74. Шнековая двухбарабанная сушилка для щепы:

1 — верхний сушильный барабан; *2* — нижний сушильный барабан; *3* — валы барабана с лопастями; *4* — тормозные перегородки; *5* — шнековый питатель; *6* — газоход для отработавшего теплоносителя; *7* — газоход для подачи теплоносителя

Щепа перемещается по барабанам при помощи лопастей валов, расположенных внутри каждого из них.

Скорость вращения вала верхнего барабана равна 33, а нижнего 36 *об/мин*.

При испытании шнековой сушилки получены следующие результаты: производительность по абс. сух. щепе 1,1—1,7 *т/ч*; относительная влажность щепы до сушилки 35—40%, после сушилки 7—22%; удельное напряжение рабочего объема сушилки по испаряемой воде 130—145 *кг/м*^{3} · *ч*; температура теплоносителя до сушилки 350—430°, после сушилки 80—120°; температура щепы после сушки 70—90°.

Температура теплоносителя в нижнем барабане снижается на 240—310°, а в верхнем — на 13—49°. Эти данные указывают на то, что процесс сушки щепы в основном протекает в нижнем барабане, где происходит наиболее интенсивная передача тепла от

теплоносителя к щепе, сопровождаемая более значительным понижением его температуры. По данным теплового баланса, на удалении влаги из щепы расходуется 57—59% тепла, на нагрев щепы 13%, потери тепла с отработавшим теплоносителем составляют 20—21% и в окружающую среду 7—10%. Средний расход тепла на испаренную влагу равен 1060 *ккал/кг*, что можно считать удовлетворительным.

Для улучшения конструкции сушильные барабаны были укорочены на 1500 *мм* каждый. Валы барабанов изготовлены из труб с внутренним диаметром 160 *мм* и толщиной стенки 18 *мм*. Выброс щепы лопастями вала производится теперь через окна, сделанные в стенке каждого барабана. Поэтому степень заполнения барабана щепой возросла до 0,50; увеличились также рабочий объем сушилки и время пребывания щепы в зоне сушки. Секторный затвор для загрузки щепы из сушилки в газогенератор заменен шнековым питателем.

Работа газогенератора (см. рис. 35). Было проведено несколько испытаний на щепе, содержащей 15—28% хвои, 18—28% коры, 44—67% древесины и один опыт на щепе из отходов без хвои, содержащих 15% коры и 85% древесины.

Средний размер щепы составлял 17—29 *мм*. Относительная влажность щепы, поступающей в газогенератор, равнялась 19—21,6%, а в одном опыте — 7,1%. Интенсивность газификации в пересчете на абс. сух. щепу на уровне периферийного дутья 310—376 *кг/м²·ч*. Влажность выгребаемой из газогенератора золы была 38—42%. Количество в золе угля в пересчете на абс. сух. навеску 31—58%. Из лесосечных отходов, содержащих в большом количестве кору и хвою, выход продуктов значительно отличается от выходов из щепы, полученной из отходов без хвои. Так, в первом случае из лесосечных отходов выход газа был равен 1,79—1,88 *нм³/кг* (на абс. сух. щепу), а из щепы без хвои 1,58 *нм³/кг*; соответственно расход дутья составлял 1,08—1,205 и 0,875 *нм³/кг*, пара в дутье 0,239 и 0,173 *кг/кг*. Теплота сгорания газа (низшая) 1140—1380 *ккал/нм³*.

Из лесосечных отходов, содержащих, кроме коры, хвою, выход жидких продуктов от веса абс. сух. щепы в среднем составлял (в %): смолы 12,8, летучих кислот (в пересчете на уксусную) 2,3. Выход этих же продуктов из щепы без хвои (в %): смолы 16,5 и летучих кислот 3,9 [50].

По средним данным тепловых балансов на отходах с хвоей к. п. д. газогенератора по газу был равен 50,6%, а по органическим жидким продуктам 27,4%. Потери при газификации составляли 22%, в том числе 2% с горючей частью золы. Приведенные данные указывают на то, что лесосечные отходы являются хорошим сырьем для производства главным образом топливного газа. Для увеличения выходов смолы в условиях леспромхозов целесообразнее не газифицировать хвою, а перерабатывать ее с целью

получения различных полезных продуктов (хвойно-каротиновой пасты, хвойно-витаминной муки и др.). При такой организации комплексного производства генераторный газ может быть полностью использован для собственных нужд.

В ряде случаев с этой же целью целесообразно использовать для газификации различные отходы стволовой древесины (обрезки, щепу, и прочую неликвидную древесину).

Дополнительные сведения о Верховской ГГУ. Улавливание веществ из газов осуществляется в основном центробежным смолоотделителем. Газ предварительно охлаждается в горловине газогенератора и оросительном скруббере.

Таблица 158

Улавливание из газа, смолы и кислоты аппаратами установки

Аппараты	Средняя температура газа, °С	Количество выделенных из газа продуктов, %	
		смолы	летучих кислот
Оросительный скруббер и горловина газогенератора	80	25	45
Центробежный смолоотделитель	75	65	13
Потери с газом, выходящим из смолоотделителя	—	10	42

Из табл. 158 видно, что смола улавливается на 90%, а летучие кислоты на 58%. Увеличение степени извлечения смолы из газа возможно путем снижения температуры газа перед смолоотделителем (например, до 65—70°), а также путем орошения газа в смолоотделителе циркулирующей жижкой или смолой.

При газификации лесосечных отходов, содержащих кору и хвою, количество растворимой смолы (отделяемой от отстойной путем промывок водой) составляет примерно 30% общего количества газогенераторной смолы. При газификации щепы без хвои растворимой смолы содержится 50%.

Отстойные смолы, промытые горячей водой, удовлетворяют требованиям, предъявляемым к мягчителям, которые применяются в промышленности для регенерации резины (табл. 159).

Смола ГГУ Верховского леспромхоза успешно используется в качестве мягчителя на нескольких регенератных заводах.

8. ПРИЛУКСКАЯ ГАЗОГЕНЕРАТОРНАЯ УСТАНОВКА

Сырьем для установки служат сосновые дрова и различные древесные отходы. Производительность установки по исходной древесине составляет около 5—6 тыс. *пл. м³/год* (см. рис. 33).

После ряда доводок и переделок была освоена технологическая схема производства, приведенная на рис. 75. Исходное сырье (дрова, корни, пни, ветки, вершины и др.) измельчаются в рубильной машине (ДУ-2) *1*. Полученная щепа автоматически

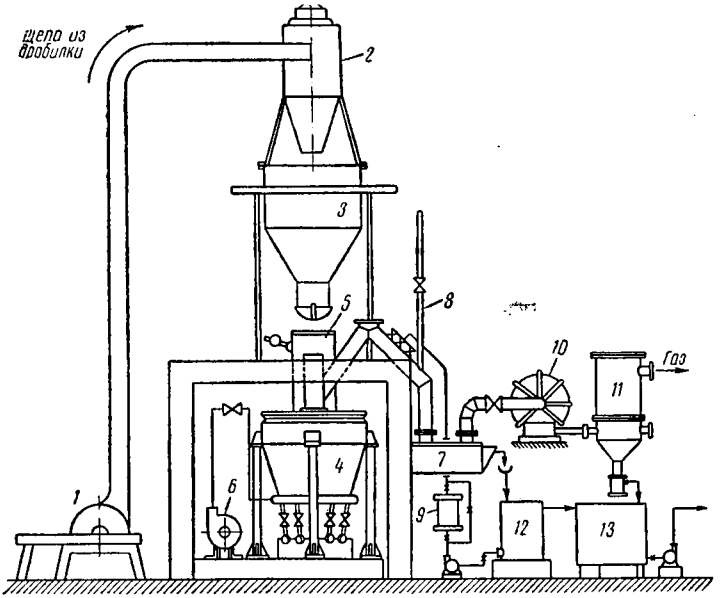


Рис. 75. Схема Прилукской газогенераторной установки:

1 — рубильная машина ДУ-2; *2* — циклон; *3* — бункер для щепы; *4* — газогенератор; *5* — загрузочная коробка для щепы; *6* — центробежный вентилятор; *7* — гидрозатвор; *8* — труба для розжига газогенератора (свеча); *9* — холодильник для циркулирующей жижки; *10* — центробежный вентилятор-смолоотделитель; *11* — каплеулавливатель; *12* — сборник жижки; *13* — отстойник

Таблица 159

Анализ отстойной смолы Верховской ГГУ как мягчителя для регенераторной промышленности (см. табл. 26)

Смола	Влажность, %	Удельный вес при 20°	Механические примеси, %	Водорастворимые кислоты, %	Вещества, не растворимые в бензине, %	Смоляные кислоты, %
Из лесосечных отходов, содержащих хвою	5,6—6,1	1,08—1,184	0,63—0,76	0,5—2,0	43,3—50,6	19,7—21,6
Из лесосечных отходов без хвои	5,5	1,18	0,79	0,85	53,3	17,6

забрасывается при помощи циклона *2* в бункер *3*. Искусственной сушки щепы не предусмотрено. Ввиду небольших масштабов производства применяется естественная сушка исходной древесины.

Щепа периодически загружается в газогенератор *4* при помощи загрузочной коробки *5*. Дутье для газификации щепы подается от центробежных вентиляторов высокого давления *6*. Одна воздуходувка рабочая, вторая резервная. Паровоздушное дутье (50—65°) в шахте распределяется при помощи периферийных фурм.

Газ, выходящий из газогенератора по двум горловинам, направляется в гидрозатвор *7*, служащий для отключения газогенератора и удаления небольшого количества древесной мелочи. Для розжига газогенератора служит дымовая труба *8*. Охлаждение газа производится путем орошения парогазов в горловине газогенератора циркулирующей жижкой, охлаждаемой в свою очередь в трубчатом холодильнике *9*.

Охлажденный газ поступает в смолоотделитель *10*, роль которого выполняет центробежный вентилятор, изготовленный из кислотоупорной стали. Ротор вентилятора имеет диаметр 700 *мм*. Число лопаток, расположенных радиально, *12*. Скорость вращения этого ротора 900 *об/мин*. Из смолоотделителя газ поступает в каплеулавливатель *11* (рис. 76). Обессмоленный сырой газ пригоден для использования в топках паровых котлов. Конденсат, стекающий из гидрозатвора и смолоотделителя, направляется в сборник *12* (см. рис. 75), а затем в отстойник *13*. Температура газа в горловине газогенератора 74—76°, в смолоотделителе 60—62°. Давление дутья изменяется в пределах 60—80 *мм* вод. ст., газа в горловине газогенератора 4—6 *мм* вод. ст.

Таблица 160

Выход газа и жидких продуктов при газификации щепы на Прилукской ГГУ (опыты ЦНИЛХИ)

Газифицируемая щепа	Относительная влажность щепы, %	Производительность газогенератора по абс. сух. щепе, *кг/ч*	Выход газа от веса абс. сух. щепы, *нм³/кг*	Выход продуктов от веса абс. сух. щепы, %	
				смолы	летучих кислот (в пересчете на уксусную)
Из свежих сосновых пней (содержащих смолистых веществ в щепе 5,3—7,8%) . .	41—44	485	1,59—1,60	20,4—30,0	3,4—4,7
Из еловых дров	41,5	470	1,55	20,7	4,4
Из осиновых дров	49—52	330—500	1,52—1,94	9,8—13,9	2,2—2,3

На основании исследований, проведенных ЦНИЛХИ, выход продуктов при газификации различной древесины приведен в табл. 160.

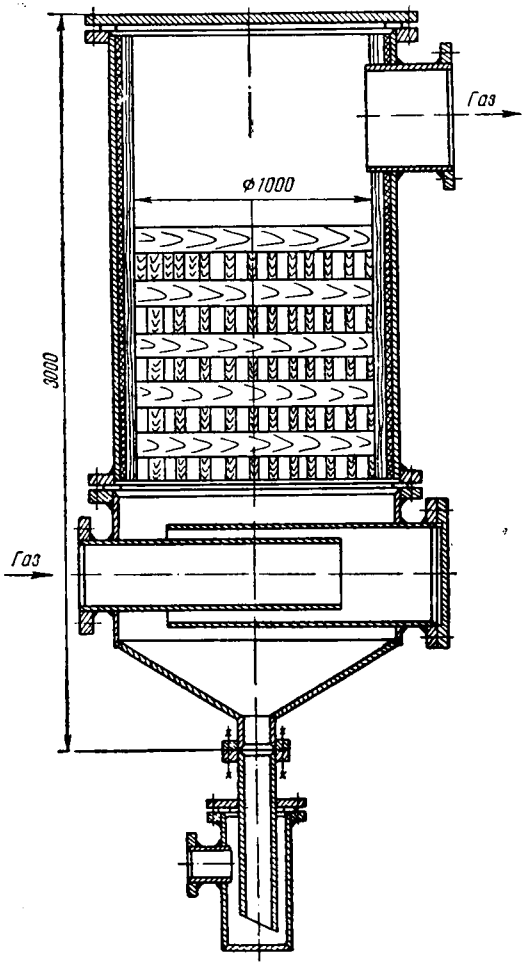


Рис. 76. Каплеулавливатель для смолоотделителя Прилукской ГГУ

При температуре газа около 60° суммарное улавливание смолы в охладителе и смолоотделителе составляет примерно 94—95%. В суммарном конденсате, полученном в гидрозатворе, охладителе газа и смолоотделителе содержится примерно 30% суммарной смолы (растворимой и отстойной).

Газогенераторная установка является звеном комплексного производства, в состав которого входит цех хвойно-лечебного экстракта.

Отходы хвойного цеха (вершины и сучки без хвои) используются в качестве сырья для ГГУ. На 1 *т* хвойной лапки, перерабатываемой в цехе при получении хвойно-лечебного экстракта, приходится примерно 300—500 *кг* отходов. Генераторный газ можно использовать в топках котельной цеха.

9. ГАЗОГЕНЕРАТОРНАЯ УСТАНОВКА ПО СХЕМЕ ЦНИЛХИ—ЦНИИМЭ

Силами ЦНИЛХИ и ЦНИИМЭ разработан технологический процесс переработки древесных отходов путем газификации их с получением химических продуктов и очищенного генераторного газа для использования его в двигателях внутреннего сгорания.

Опытная установка по такой схеме создана в Крестецком леспромхозе [1], [51], [52].

Опыт этой установки показал, что при газификации лесосечных отходов относительной влажностью 50% выход суммарной смолы (в пересчете на абс. сух.) составляет от веса абс. сух. щепы около 7%, а при газификации подсушенной щепы относительной влажностью 30—36% выход суммарной смолы увеличивается на 45%.

Сушка щепы на этой ГГУ производится в барабанной сушилке диаметром 1200 *мм* и длиной 10 000 *мм*.

При начальной температуре теплоносителя 600—650° производственный удельный влагосъем достигал 40—50 *кг/м*$^3 \cdot$ *ч*.

Для уменьшения количества отбросной воды предусмотрена ее циркуляция с применением градирни. Из 1 *пл. м*^{3} щепы запроектировано получение электроэнергии 110 *квт·ч*, 50 *кг* смолы, 21 *кг* древесноуксусного порошка.

10. ТИПОВЫЕ ПРОЕКТЫ ЭНЕРГОХИМИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСНЫХ ОТХОДОВ МЕТОДОМ ГАЗИФИКАЦИИ

Типовые проекты, разработанные ЦНИЛХИ, различаются между собой по количеству газифицируемой древесины.

По проекту ТП-4-11-72/63 мощность ГГУ по исходному сырью рассчитана на 25 тыс. *пл. м*^{3}*/год*. Установка состоит из одного газогенератора и дополнительного комплекта оборудования, проверенного в производстве.

По проекту ТП-4-11-73/63 перерабатывается древесных отходов 50 тыс. *пл. м*^{3}*/год*. Эта ГГУ включает два газогенератора и необходимое к каждому из них оборудование.

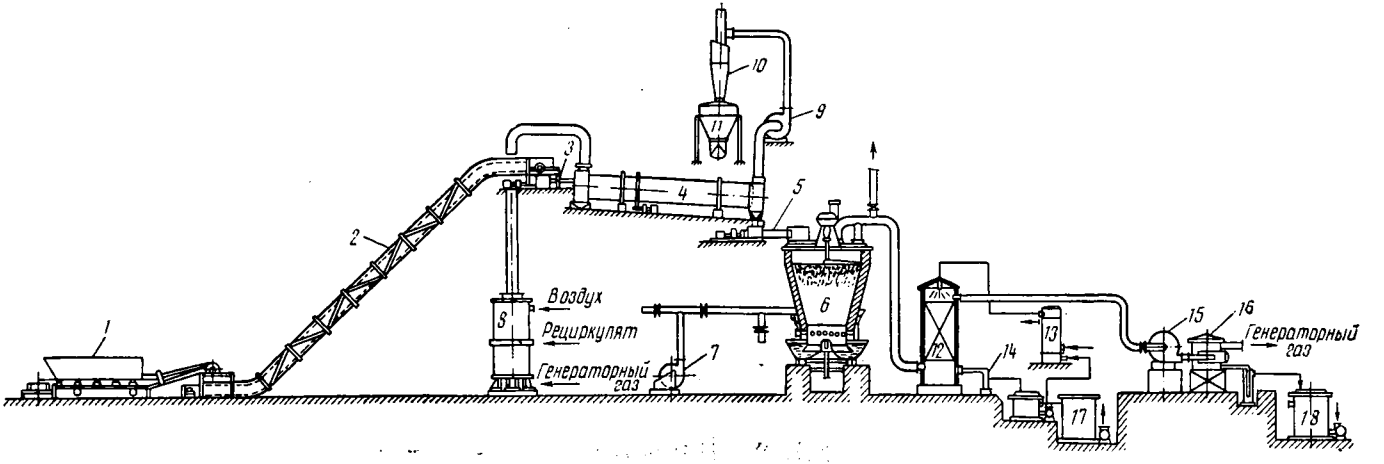


Рис 77. Схема технологического процесса газогенераторной установки по типовому проекту ТП-4-11-72/63 ЦНИЛХИ:

1 — бункер для сырой щепы с дозировочным механизмом; *2* — скребковый транспортер для сырой щепы; *3* — шнековый питатель для сырой щепы; *4* — барабанная сушилка; *5* — шнековый питатель для сухой щепы; *6* — газогенератор; *7* — воздуходувка; *8* — топка-смеситель; *9* — дымосос для отработавших газов сушилки; *10* — циклон; *11* — бункер для пыли; *12* — конденсатор смешения; *13* — трубчатый холодильник для циркулирующего газогенераторного конденсата; *14* — гидрозатвор; *15* — центробежный смолоотделитель; *16* — каплеулавливатель; *17* — сборник жижки; *18* — сборник смолы

ГГУ предназначены для переработки лесосечных отходов и неликвидной стволовой древесины, скапливающихся на нижних складах леспромхозов. Не исключено использование для газификации отходов деревообработки.

Основной продукцией энергохимического производства являются суммарный газогенераторный конденсат (кислая смола) и сырой генераторный газ, используемый в качестве топлива для котельной, сушил и др.

Технологический процесс запроектированных ГГУ включает следующие основные операции: измельчение отходов, сушку полученной щепы, газификацию сухой щепы и улавливание из газа жидких продуктов (смолы).

Отличительной особенностью рассматриваемых ГГУ является следующее: схема производства проста; аппаратура для установки достаточно проверена в производственных условиях; установки могут работать без сточных вод, так как сырой газ с остатками паров воды и неизвлеченных органических продуктов сжигается в топках; жидкие продукты, выделенные из газа в виде полупродукта (кислой смолы), на месте не перерабатываются, а отправляются потребителю для последующего использования. Основное оборудование установки монтируется вне здания, что обеспечивает удовлетворительные санитарно-гигиенические условия труда рабочих и позволяет значительно сократить капитальные затраты на строительство сооружений, а также затраты на сантехнические, электротехнические и другие работы.

На рис. 77 приведена схема технологического процесса газогенераторной установки по типовому проекту ЦНИЛХИ.

Щепа из механизированного бункера *1* емкостью 8 *м*^{3} дозировочным механизмом подается на скребковый транспортер (ЦТО-16-2) *2*, а затем шнековым питателем *3* направляется в барабанную сушилку *4*. Барабанная сушилка диаметром 1200 *мм*, длиной 10 000 *мм*, производительностью по щепе 10 *нас. м*^{3}/*ч*. В сушилке щепа высушивается от 50 до 25% относительной влажности. Теплоносителем являются топочные газы с начальной температурой 700°, поступающие из топки-смесителя *8*, в которой сжигается сырой генераторный газ, выходящий из каплеулавливателя *16*.

Отработавшие газы дымососом *9* удаляются из барабанной сушилки при температуре 150° и направляются в циклон *10*, а затем выбрасываются в атмосферу. Часть этих газов направляется в топку-смеситель *8*, где используется как рециркулят для снижения температуры продуктов горения с 1200 до 700°.

Древесная пыль из бункера *11* вывозится в отвал. Сухая щепа из барабанной сушилки через шнековый питатель *5*, служащий одновременно затвором, подается в газогенератор *6*. Газогенератор имеет конусную шахту, расширяющуюся кверху. Дутье — центральное и периферийное. Для распределения щепы по сече-

нию шахты имеется разравниватель. Выгреб золы из газогенератора механизирован при помощи вращающейся чаши.

Температура парогазовой смеси, выходящей из газогенератора, около 100°.

Процесс газификации древесины протекает при паровоздушном дутье с температурой 55—65°.

Воздух в газогенератор и топку-смеситель подается воздуходувкой *7*.

Парогазовая смесь из горловины газогенератора поступает в конденсатор смешения *12*, представляющий собой скруббер с хордовой насадкой, которая непрерывно орошается циркулирующим газогенераторным конденсатом, предварительно охлажденным в трубчатом холодильнике *13*.

В конденсаторе смешения сырой генераторный газ охлаждается со 100 до 70°. Конденсат из конденсатора смешения через гидрозатвор *14* собирается в сборнике *17*.

Сырой газ из конденсатора смешения поступает в центробежный смолоотделитель *15*, в качестве которого применяется турбогазодувка ТГ-150 завода Узбекхиммаш, и далее в каплеулавливатель *16*. Конденсат из каплеулавливателя стекает в сборники смолы *18*. Обессмоленный генераторный газ с температурой 65—70° поступает в топку-смеситель *8*.

Суммарный конденсат по мере наполнения сборников откачивается центробежным насосом в один из двух стальных резервуаров, футерованных деревом по битуму и кошме. Емкость резервуаров для хранения кислой смолы рассчитана на 15-суточную производительность ГГУ.

Выход суммарного конденсата при переработке древесных отходов принят 120 *кг/пл. м*^{3}. Конденсат состоит из 58% смолы, 7% летучих кислот, 35% воды.

Выход газа с теплотой сгорания 1160 *ккал/нм*^{3} равен 986 *нм*^{3}*/пл. м*^{3}. Часть генераторного газа расходуется для сушки газифицируемой щепы (41%), а остальное количество (59%) направляется в топки котельной, сушил леспромхоза или другим потребителям.

Расходные коэффициенты на 1 *пл. м*^{3} древесных отходов следующие: пара (давление 2—4 *ати*) 87 *кг*, воды 2,24 *м*^{3} и электроэнергии 21,7 *квт·ч*.

Установку обслуживают 13 человек, из них 11 рабочих. Затраты труда на энергохимическую переработку 1 *пл. м*^{3} отходов составляют 0,124 *чел.-дня*. Капитальные затраты на создание ГГУ 89 580 руб. (без дополнительных затрат, обычно возникающих при привязке типовых проектов). По отдельным статьям эти затраты распределяются следующим образом (в %): стоимость оборудования 38; монтаж оборудования 21; строительные работы 32 и прочие расходы 9.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. И. Качелкин. Использование отходов лесозаготовок. Изд-во «Лесная промышленность», 1965.

2. Б. А. Ильин. Использование древесных отходов и низкосортной древесины за рубежом. Госэнергоиздат, 1961.

3. В. А. Лямин. Энергохимическое использование древесных отходов лесозаготовительных предприятий. Труды ЛТА им. С. М. Кирова № 72, 1955.

4. Д. И. Элькин. Газификация древесины — сырьевой источник для производства уксусной кислоты и других ценных продуктов. Труды ЦНИЛХИ. Вып. 7, 1947.

5. В. Н. Козлов, В. С. Высечкин. Исследования процесса обугливания древесины различной влажности в вертикальной стационарной реторте. Труды ЦНИЛХИ. Вып. 1, Гослестехиздат, 1938.

6. В. А. Лямин. Организация комплексного производства экстракционной канифоли, скипидара и сосновой смолы. Журн. «Гидролизная и лесохимическая промышленность», 1962, № 3.

7. В. А. Лямин. Новое сырье для лесохимической промышленности из отходов лесозаготовок и деревообработки. Труды ЛТА им. С. М. Кирова, № 72, 1955.

8. Б. Д. Кацнельсон, Ю. Н. Корчунов и др. Слоевые методы энергохимического использования топлива. Госэнергоиздат, 1962.

9. К. М. Ашкинази. Характеристика отходов производства лесозаготовительных предприятий. Труды ЛТА им. С. М. Кирова, № 72, 1955.

10. М. В. Канторов. Газогенераторы и газогенераторные станции. Металлургиздат, 1958.

11. В. А. Лямин. Энергохимическое использование древесных отходов. Известия института лесохозяйственных проблем АН Латв. ССР. Вып. VIII, 1955.

12. В. А. Лямин, А. С. Немкин. Влияние измельчения древесины на выход жидких продуктов газификации. Журн. «Лесохимическая промышленность», 1940, № 8.

13. В. А. Лямин, Т. И. Прохорчук. Опыт газификации еловой щепы различной влажности. Труды ЛТА им. С. М. Кирова, № 87, 1959.

14. В. А. Лямин. Газификация мелкой щепы различной влажности. Журн. «Гидролизная и лесохимическая промышленность», 1962, № 8.

15. Р. И. Грабовский. Атмосферные ядра конденсации. Гидрометеоиздат, 1956.

16. В. А. Лямин, А. С. Немкин. К вопросу о выходах газа и побочных продуктов при газификации щепы различных пород. Журн. «Лесохимическая промышленность», 1940, № 3.

17. А. А. Ливеровский, Р. С. Тюльпанов. О выходах химикатов при энергохимическом использовании древесины. Журн. «Гидролизная и лесохимическая промышленность», 1959. № 7.

18. А. К. Славянский, В. И. Шарков и др. Химическая технология древесины. Гослесбумиздат, 1962.

19. В. А. Лямин, Н. Д. Авакян, С. Л. Смолко. Влияние коры и гнили на выход лесохимикатов при пиролизе осиновой древесины. Труды ЛТА № 85, 1959.

20. Б. И. Китаев. Теплообмен в шахтных печах. Металлургиздат, 1967.

21. Н. В. Чалов. Влияние влажности и высоты слоя щепы в газогенераторе на выход смолы и уксусной кислоты. Журн. «Деревообрабатывающая и лесохимическая промышленность», 1953, № 12.

22. А. К. Славянский. Новые методы пиролиза древесины. «Лесная промышленность», 1965.

23. В. И. Шарков. О химическом составе отходов лесозаготовок. Журн. «Гидролизная и лесохимическая промышленность», 1955, № 7.

24. А. С. Коссой. Использование лесосечных отходов в производстве химической древесной массы для картона. ЦБТИ бумажной и деревообрабатывающей промышленности, 1961.

25. К. И. Ногин. Смолокурение и дегтекурение, Госхимиздат, 1932.

26. В. А. Лямин. Газификация отработанной канифольно-экстракционной щепы. Журн. «Гидролизная и лесохимическая промышленность», 1959, № 7.

27. В. А. Лямин. Смолокурение в газогенераторе. Труды ИЛХП АН Латв. ССР. Вып. 16, 1958.

28. З. Ю. Дубин. Опыт работы Головичненского смоло-скипидарного завода. Минск НТО лесной промышленности, 1959.

29. Н. А. Алешинский. Пособие аппаратчикам и рабочим лесохимических производств. Изд-во «Лесная промышленность», 1966.

30. В. А. Лямин. Выход продуктов при газификации коры хвойных пород древесины. Журн. «Гидролизная и лесохимическая промышленность», 1965, № 3.

31. Н. В. Чалов, О. А. Александрова. Равновесие уксусной кислоты в системе газ—древесная генераторная смола. Журн. «Гидролизная и лесохимическая промышленность», 1958, № 8.

32. А. И. Скриган. Исследование сосновых пней-отходов торфоразработок и получение из них химических материалов и строительных изделий. Сборник научных работ АН БССР ИФОХ. Вып. 7, 1959.

33. А. И. Скриган. О химическом использовании болотного глубинного осмола торфоразработок. Материалы Белорусской республиканской конференции научного инженерно-технического общества лесной промышленности и лесного хозяйства. Минск, 1951.

34. В. А. Лямин. Получение смолы — мягчителя для регенерации резины. Журн. «Гидролизная и лесохимическая промышленность», 1963, № 4.

35. С. Д. Федосеев, А. Б. Чернышев. Полукоксование и газификация твердого топлива. Гостоптехиздат, 1960, стр. 58.

36. Б. Ф. Никандров. Разработка технологии получения фурфурола в процессе предпиролиза древесины. Диссертация. ЛТА, Л., 1965.

37. В. И. Корякин. Термическое разложение древесины. Гослесбумиздат, 1962.

38. Ф. П. Комаров, А. П. Яковлев. О химическом составе древесины ствола и ветвей некоторых русских пород. Журн. «Бумажная промышленность», 1932, № 3.

39. Ю. И. Холькин, Г. Н. Черняева. Методы повышения устойчивости технического фурфурола. Журн. «Гидролизная и лесохимическая промышленность», 1963, № 7.

40. С. П. Жебровский. Электрофильтры. Госэнергоиздат, 1950.

41. В. А. Лямин, Н. В. Чалов. Осадительный электрод к электрофильтрам. Авторское свидетельство № 51587, НКТП, 1937.

42. Г. А. Находкин. Модернизированный электрофильтр для очистки от смолы древесного газа. ЦБТИ бумажной и деревообрабатывающей промышленности, 1957.

43. Н. В. Чалов, В. А. Лямин. Очистка генераторного газа из древесины от смолы в электрофильтрах пластинчатого типа. «Вестник инженеров и техников», 1947, № 1.

44. Я. А. Сурна, А. И. Калниньш. Рационализация конденсационной системы сухоперегонных реторт с внутренним обогревом. Труды ИКХП, АН Латв. ССР. Вып. 16, 1958.

45. Э. М. Цацка. Применение центробежного вентилятора-смолоотделителя типа ЦКТИ—ЛПИ для очистки сырого газа. Журн. «Гидролизная и лесохимическая промышленность», 1959, № 7.

46. Н. В. Чалов, И. П. Цветаева. Распределение метилового спирта между паровоздушной смесью и водой в условиях равновесия. «Журнал прикладной химии», 1946, № 9, стр. 946—951.

47. Н. В. Чалов. Утилизация побочных продуктов газификации древесины. Гослестехиздат, 1940.

48. В. А. Лямин. Исследование процесса газификации древесного топлива в газогенераторе повышенной производительности при паровоздушном дутье. Диссертация ЛТА им. С. М. Кирова, Л., 1953.

49. В. А. Лямин, Т. И. Прохорчук. К вопросу о переработке газогенераторных конденсатов на лесохимических заводах. «Лесной журнал», 1959, № 5.

50. Р. М. Каминская. Энергохимическое использование лесосечных отходов. Архангельск, изд. Сев.-Зап. Совнархоза, 1963.

51. М. С. Зарецкий, С. И. Головков. Выбор оптимальной схемы энергохимического использования древесных отходов. Труды XXVII ЦНИИМЭ, 1961.

52. Ю. В. Михайловский. Энергохимический комплекс ЦНИЛХИ—ЦНИИМЭ. ВДНХ, Москва — Химки, 1962.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Стр.

Введение 3

Глава I. Теоретические основы газификации древесины 10
1. Процессы, протекающие при газификации древесины 11
2. Основные факторы, влияющие на процесс газификации древесины 17
Глава II. Исследование процесса газификации древесины на опытной установке 37
1. Выход продуктов при газификации щепы из лесосечных отходов и стволовой древесины 40
2. Выход продуктов при газификации промышленных лесосечных отходов 56
3. Выход продуктов при газификации лесопильных отходов . . 60
4. Выход продуктов при газификации отходов катушечного производства 62
5. Выход продуктов при газификации отходов фанерного производства 64
6. Выход продуктов при газификации отработанной канифольно-экстракционной щепы 66
7. Выход продуктов при газификации щепы из осмола и сосновых дров 70
8. Выход продуктов при газификации щепы из сосновых пней торфопредприятий 81
9. Выход продуктов при газификации еловой коры 88
10. Выход продуктов при газификации осиновой коры 93
11. Выход продуктов при газификации хвойных лесосечных отходов, не содержащих хвою 97
12. Выход продуктов при газификации щепы по схеме регенеративного процесса 103
13. Выход продуктов при газификации щепы с двойным отбором газа 109
14. Выход продуктов при газификации щепы с кислыми катализаторами 115
15. Опыт газификации хвои 142
16. Опыт газификации щепы с отбором угля из газогенератора 143
17. Сравнительные данные выходов жидких продуктов, полученных при газификации древесины на опытной установке ЛТА и промышленных ГГУ 144
Глава III. Типы и конструкции промышленных газогенераторов для древесины 145
1. Дровяные газогенераторы 145
2. Газогенераторы конструкции проф. Пильника 148
3. Газогенераторы Ижевской газогенераторной станции 148

4. Газогенераторы Сегежской газогенераторной станции . . . 151
5. Недостатки газогенераторов с суженной швельшахтой и центральным способом подачи дутья 151
6. Усовершенствованные конструкции газогенераторов для щепы 153
Глава IV. Аппараты для осаждения смолы из древесногенераторного газа 159
1. Электрофильтры 159
2. Центробежные газодувки и вентиляторы, применяемые в качестве смолоотделителей 164
Глава V. Извлечение жидких продуктов из древесногенераторного газа 169
1. Технологическая схема А. А. Деревягина 169
2. Описание основной аппаратуры для улавливания уксусной кислоты и охлаждения газа 171
3. Технологическая схема ЛТА 173
4. Теоретические основы улавливания жидких продуктов из древесногенераторного газа по схеме ЛТА 175
5. Исследование конденсатора-холодильника 175
6. Исследование смолоотделителя 177
Глава VI. Промышленные газогенераторные станции и установки на древесине 183
1. Ижевская газогенераторная станция 183
2. Сегежская газогенераторная станция 197
3. Чагодощинская газогенераторная станция 198
4. Газогенераторная станция Нижнетагильского металлургического завода 207
5. Амзинская газогенераторная установка 208
6. Лабораторные и производственные данные о переработке газогенераторных конденсатов 235
7. Верховская газогенераторная установка 244
8. Прилукская газогенераторная установка 250
9. Газогенераторная установка по схеме ЦНИЛХИ—ЦНИИМЭ . 254
10. Типовые проекты энергохимических установок для переработки древесных отходов методом газификации 254
Литература 258