

Министерство образования и науки России  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего профессионального образования  
«Казанский национальный исследовательский  
технологический университет»

Д.Ф. Зиатдинова

РАЗРАБОТКА РЕСУРСО-  
И ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ  
ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСНЫХ МАТЕРИАЛОВ,  
СОПРОВОЖДАЮЩИХСЯ ВЫДЕЛЕНИЕМ  
ПАРОГАЗОВОЙ ФАЗЫ

Монография

Казань  
Издательство КНИТУ  
2013

УДК 684.4.05

**Зиятдинова Д.Ф.**

Разработка ресурсо- и энергосберегающих технологий переработки древесных материалов, сопровождающихся выделением парогазовой фазы : монография / Д.Ф. Зиятдинова; М-во образ. и науки России, Казан. нац. исслед. технол. ун-т. – Казань : Изд-во КНИТУ, 2013. – 244 с.  
ISBN 978-5-7882-1452-8

Рассмотрены технологии переработки древесных материалов и аппаратное оформление процессов, сопровождающихся выделением парогазовой фазы. Предложена обобщающая математическая модель, позволяющая рассчитывать кинетику процессов и конструктивные параметры аппаратного оформления. Приведены результаты внедрения отдельных технологий в промышленность.

Предназначена для ИТР, научных сотрудников, аспирантов, магистрантов направления 250400.68 «Технология лесозаготовительных и деревообрабатывающих производств».

Подготовлена на кафедре переработки древесных материалов.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Казанского национального исследовательского технологического университета.

Рецензенты: д-р, техн. наук, проф., директор ООО «Энергоиспром»  
*А.Н. Грачев*  
д-р, техн. наук, проф., директор НТУ «Альтернативная энергетика» *Н.Ф. Тимербаев*

ISBN 978-5-7882-1452-8

© Зиятдинова Д.Ф., 2013

© Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2013

## Предисловие

Научно-технический прогресс и связанные с ним грандиозные масштабы производственной деятельности человека привели не только к большим позитивным преобразованиям в мире, но и к резкому ухудшению состояния окружающей среды. Усиление техногенного воздействия на окружающую среду породило ряд экологических проблем, связанных с состоянием атмосферы, гидросферы и литосферы.

Любой объект промышленного производства в своей «эволюции» проходит три основные стадии: сырье (основные и вспомогательные материалы), собственно производство и готовая продукция. Большинство операций подготовки исходных сырья и материалов к осуществлению технологического процесса в наиболее эффективной с точки зрения производства форме (очистка, обогащение и т.д.) и операций, составляющих технологический процесс, связаны с образованием различных отходов. Использование готовой продукции также может сопровождаться образованием вредных веществ, а по истечении срока эксплуатации продукции требуется ее утилизация или вторичная переработка.

Основным направлением охраны окружающей среды от загрязнения промышленными отходами деревообрабатывающих производств должна быть разработка малоотходных и безотходных технологических производств. Однако задача создания безотходных технологий – стратегическая и рассчитана на длительный период. Сокращение же отходов существующего деревоперерабатывающего производства – острейшая проблема настоящего и наиболее распространенным методом решения этой проблемы на сегодняшний день остается разработка эффективных очистных установок для улавливания и переработки газообразных, жидких и твердых отходов.

Определение приоритетного направления концентрации внимания, сил и средств в вопросах охраны окружающей среды весьма условно, но все же по целому ряду причин необходимо отдать предпочтение проблеме защиты атмосферного воздуха. Во-первых, атмосфера – защитный слой Земли, целостность которого определяет состояние человечества и само существование жизни на планете. Во вторых, воздушные потоки, осадки и другие атмосферные явления «не признают» государственных границ. А в третьих, именно через атмосферу замыкается круговорот большинства вредных веществ независимо от агрегатного состояния выбросов.

## Введение

Рациональное природопользование и экологическая безопасность технологических процессов - приоритетное направление развития экономики РФ, обуславливающее необходимость разработки энерго- и ресурсосберегающих технологий.

Россия обладает огромными лесными ресурсами. Повышение эффективности деревообрабатывающих производств, коэффициента использования древесины местных и привозных пород и охрана окружающей среды в настоящее время являются актуальными задачами. Требуется усовершенствованная и экологически чистая технология переработки древесины, позволяющая пересмотреть вопросы использования древесины, в том числе низкосортной, для нужд деревянного домостроения, мебельного, бумажного, спиртодрожжевого производств.

В силу возрастающих масштабов производственной деятельности человека и связанного с этим катастрофического уровня техногенного воздействия на окружающую среду охрана окружающей среды в последние годы стала одной из важнейших проблем человечества. Решение этой проблемы напрямую зависит от разработки безотходных технологий. Но на современном этапе человечество не имеет достаточных ресурсов для закрытия существующих производств и перехода только на безотходные технологии. Поэтому в настоящее время наиболее распространенным методом решения проблемы защиты окружающей среды остается присоединение к существующему технологическому процессу эффективного оборудования для улавливания и переработки отходов. Усилия многих ведущих ученых направлены на совершенствование очистного оборудования и интенсификацию процесса массообмена за счет увеличения поверхности контакта фаз и использования интенсивных гидродинамических режимов. Такой подход приводит к увеличению габаритов очистных установок и повышению энергозатрат, но не уменьшает общего количества образующихся выбросов.

Наиболее остро эта проблема стоит в вопросах защиты атмосферного воздуха, так как объемы парогазовых выбросов современных промышленных предприятий составляют сотни тысяч кубических метров в час. Это обусловлено тем, что для снижения концентрации выделяющихся вредных паров на многих предприятиях производят лишь смешивание газовых выбросов с большими объемами вентиляционного воздуха. Более эффективным является комплексное совер-

шенствование самих технологических процессов с целью сокращения образующихся отходов, но оно осложнено многообразием сопровождающих эти процессы явлений, огромным количеством участвующих в них продуктов, отсутствием обобщенных методов расчета и схем их эффективной реализации.

Таким образом, разработка обобщенной математической модели технологических процессов, сопровождающихся выделением парогазовой фазы, создание методик расчета параметров реальных производственных процессов и характеристик оборудования для их реализации, совершенствование существующих и создание новых высокоэффективных технологических схем и их аппаратурное оформление является актуальной задачей, имеющей важное хозяйственное значение.

## **Глава 1**

# **АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИИ ПРОЦЕССОВ ХИМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

## **1.1. Современное состояние процессов химической переработки древесины, сопровождаемых парогазовыми выбросами вредных веществ в атмосферу**

### **1.1.1. Характеристики технологических процессов по выбросам токсичных веществ**

Химической переработкой древесины занимается целлюлозно-бумажная, гидролизная, лесохимическая промышленность. Целлюлозно-бумажная промышленность относится к ведущим отраслям народного хозяйства, так как Россия располагает огромными лесосырьевыми ресурсами. Кроме того, велика потребность в продукции этой отрасли как в России, так и за рубежом, и это определяет большой объем выпускаемой продукции. Продукцией целлюлозно-бумажной промышленности являются различные виды волокнистых полуфабрикатов (в том числе, сульфитная и сульфатная целлюлоза), бумага, картон и изделия из них. Побочные продукты отрасли: кормовые дрожжи, канифоль, скипидар, жирные кислоты и др.

Чем больше отрасль, тем сильнее её воздействие на окружающую среду. Предприятия целлюлозно-бумажной, гидролизной и лесохимической промышленности по воздействию на окружающую среду остаются одними из проблемных по величине токсичных выбросов в ат-

мосферу и сбросов в воду (табл.1 и табл.2) и экологической опасности для природной среды (табл.3). Кроме того, отличительной особенностью российских промышленных предприятий являются устаревшее оборудование и технологический процесс. В связи с этим отрасль отличается большой отходностью, скудностью средств очистки и нейтрализации токсичных выбросов и сбросов, применением на производстве опасных химических веществ, наличием цехов, оказывающих вредное воздействие как на персонал, так и на окружающую среду. Кроме того, опасность представляет комплексное воздействие нескольких предприятий, размещенных на одной территории. Так, смешивание отходов крупных целлюлозно-бумажных комбинатов (ЦБК), размещенных недалеко от лесоразработок и деревообрабатывающих предприятий, с отходами последних ещё более усугубляет губительное воздействие на экологию региона.

Таблица 1.1

**Ранжирование отраслей промышленности по коэффициенту токсичности выбросов в атмосферу**

Отрасли промышленности	Коэффициент токсичности	Оценка токсичности выбросов
Цветная металлургия Химическая промышленность	$K_{Т1} > 10.1$	Особенно токсичные выбросы
Нефтехимическая промышленность Микробиологическая промышленность	$K_{Т1} = 5.1 - 10.0$	Очень токсичные выбросы
Чёрная металлургия Лесная, деревообрабатывающая и целлюлозно-бумажная промышленность	$K_{Т1} = 1.6 - 5.0$	Токсичные выбросы
Теплоэнергетическая промышленность Топливная промышленность Машиностроение и металлообработка Лёгкая промышленность Пищевая промышленность	$K_{Т1} = 1.0 - 1.5$	Менее токсичные выбросы

Таблица 1.2

**Ранжирование отраслей промышленности по коэффициенту токсичности сбросов в воду**

Отрасли промышленности	Коэффициент токсичности выбросов в воду	Оценка токсичности выбросов
Микробиологическая, химическая, нефтехимическая Целлюлозно-бумажная промышленность	$K_{T2} > 5.1$	Особенно токсичные выбросы
Цветная металлургия Чёрная металлургия	$K_{T2} = 2.1 - 5.0$	Очень токсичные выбросы
Пищевая, топливная, теплоэнергетическая промышленность	$K_{T2} = 1.1 - 2.0$	Токсичные выбросы
Машиностроение и металлообработка Лёгкая промышленность Промышленность строительных материалов	$K_{T2} = 0.5 - 1.0$	Менее токсичные выбросы

Таблица 1.3

**Ранжирование отраслей промышленности по экологической опасности для природной среды**

Отрасли промышленности	Индекс экологической опасности, рассчитанный по отношению к валовой продукции	Оценка опасности отрасли
Цветная металлургия Микробиологическая промышленность	$I_Э > 10.1$	Особенно опасные
Химическая, нефтехимическая промышленность Чёрная металлургия Теплоэнергетика	$I_Э = 5.1 - 10.0$	Очень опасные



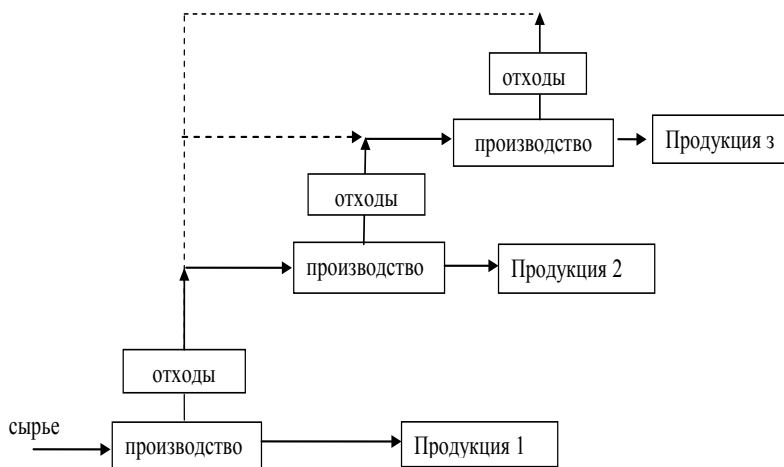
Отрасли промышленности	Индекс экологической опасности, рассчитанный по отношению к валовой продукции	Оценка опасности отрасли
Лесная, деревообрабатывающая, целлюлозно-бумажная промышленность Топливная промышленность	$I_3 = 1.1 - 5.0$	Менее опасные
Промышленность стройматериалов Пищевая промышленность Машиностроение и металлообработка Лёгкая промышленность	$I_3 = 0.05 - 1.0$	Менее опасные

В последние годы обращается особое внимание на осуществление комплекса мероприятий, направленных на охрану окружающей среды. В частности, повсеместно вводятся в эксплуатацию сложные системы газоочистки, очистные сооружения, внедряется оборотное водопользование и бессточная технология.

В технологических процессах целлюлозно-бумажных, гидролизных и лесохимических производств наряду с целевыми образуются побочные продукты, представляющие практически все классы органических и множество неорганических веществ. Если не принимаются надлежащие меры по очистке промышленных выбросов, то невосполнимый урон наносится не только окружающей природе, но и здоровью человека.

Для предупреждения загрязнения водоемов и воздушного бассейна следует использовать технологические методы, среди которых наибольшее внимание прежде всего должно уделяться следующим [23]: усовершенствование основных технологических процессов с целью сведения к минимуму выбросов вредных веществ; рекуперация и регенерация ценных химикатов из промышленных выбросов; утилизация

ценных продуктов из промышленных выбросов; создание замкнутых систем водопользования.



*Рис.1.1. Принципиальная схема безотходного производства*

Утилизация первичных отходов, образующихся непосредственно в результате проведения основных технологических процессов, и вторичных, образующихся при переработке отходов в системах рекуперации, регенерации и санитарной очистки промышленных выбросов, создает технические предпосылки для организации малоотходных и безотходных производств. Принципиальная схема безотходного производства показана на рис.1.1, где отходы одного производства являются сырьем для другого производства и т. д., при этом производства могут производить как однотипную, так и разнотипную продукцию (I, II, N). Особым видом безотходного производства является бессточная система использования воды, при которой не менее 90 % ее находится в водооборотном цикле и не более 10 % приходится на подпитку свежей водой. Для снижения выбросов вредных веществ в атмосферу необходимо использовать улавливающие устройства в вентиляционной системе. Наиболее приемлемыми из них могут быть мокрые рукавные фильтры и насадочные абсорберы [104, 58].

Среди предприятий химической переработки древесных материалов основными источниками загрязнения атмосферы являются целлюлозно-бумажные комбинаты, гидролизные заводы, предприятия лесохимии, тепловые станции, работающие на отходах деревообработки. Каждый из этих источников выделяет большое количество специфических токсичных веществ. За последние десятилетия в нашей стране и за рубежом было выполнено много работ по исследованию составов производственных выбросов. Хотя приводимая в научно-технической литературе информация далеко не полностью охватывает все технологические процессы и часто не учитывает их динамики, она вполне может быть использована для анализа выбросов. В атласах промышленных загрязнений, отраслевых и ведомственных методиках расчетов состава выбросов для ряда отраслей промышленности, энергетики и стройиндустрии [4] представлен широкий спектр производств (рис. 1.2). Выбросы в атмосферу различают по их виду, составу, концентрации, количеству, агрегатному состоянию, характеру проявления в атмосфере, влиянию на биосферу, по ценностям компонентов и множеству других признаков.

Все более широкое распространение приобретают способы получения тепловой энергии за счет термической переработки отходов деревопереработки. Но даже при сжигании такого, как принято считать, «экологически чистого» топлива, как древесина, с дымовыми газами в атмосферу выбрасывается целая гамма токсичных компонентов, представляющих собой трехфазную систему, состоящую из смеси газов, жидкости и твердых частиц. При определенных условиях возможны межфазные взаимодействия компонентов дымовых газов, переход веществ из одной фазы в другую, а также смена их агрегатных состояний [13]. Состав дымовых газов, образующихся при сжигании, чрезвычайно сложный, и в зависимости от вида сжигаемых отходов может включать в себя большое количество токсичных веществ [17]. Так, производство декоративной бумаги и плитных материалов, широко используемых для облагораживания поверхности мебели, связано с выделением в атмосферу большого количества разнообразных летучих токсичных веществ. Содержание их в выбросах обусловлено применением в технологическом процессе полимерных материалов, содержащих некоторое количество мономеров, и лакокрасочных материалов [18]. Основными источниками загрязнения атмосферы в технологии отделки поверхностей являются пропиточные линии, лаконаливные машины, аппараты конвекционной сушки, окрасочные камеры

пневматического распыления и электроосаждения лакокрасочных материалов [19]. Нанесение лакокрасочных материалов на изделия рас-



Рис. 1.2. Источники выбросов в деревообрабатывающей промышленности

пылением - один из наиболее широко применяемых способов, так как он универсален и позволяет наносить лакокрасочные материалы на изделия и детали любых размеров и форм. Но пневматическим распылением можно легко достичь нужной степени распыления многих лакокрасочных материалов лишь при условии разбавления их растворителями до нужной вязкости. Именно при этом способе, популярном в технологии отделки изделий при нанесении лакокрасочных материалов, имеем наибольшее количество выбросов. Большой расход растворителей связан с необходимостью доведения материала до вязкости, значительно меньшей, чем это требуется для хорошего растекания его по поверхности, и с большими потерями лакокрасочного материала на туманообразование при распылении [19].

Среди деревообрабатывающих предприятий по разнообразию выбросов заметно выделяются предприятия химической переработки древесины, что объясняется разнообразием технологических процес-

сов, применяемого сырья и реагентов, широким ассортиментом готовой продукции. Существенно влияют на характер выбросов особенности химической технологии: наличие периодических процессов, применение высоких температур и давлений, а также недостаточная эффективность существующих методов улавливания образующихся выбросов. Так, на большинстве предприятий по производству бумаги при варке целлюлозы и на последующей стадии её выгрузки происходит бурное вскипание смеси с выделением токсичных газов, часть которых через неплотности, имеющиеся на аппаратуре, попадает в производственное помещение и атмосферу. При производстве древесно-клееных материалов, древесно-полимерных композиционных материалов применяется большое количество фенолсодержащего связующего. При изготовлении изделий экструзией или с помощью пресс-форм образуются газообразные выбросы в виде паров кислот, фенола и т.п. [29].

Особенность современного состояния промышленного производства в том, что наибольший темп роста производства наблюдается у мелких предприятий за счет быстрого оборота средств. И, несмотря на их малые производственные мощности, суммарный поток промышленных загрязнений локальных выбросов этих предприятий весьма существен.

### **1.1.2. Специфические особенности выбросов в целлюлозно-бумажном производстве (ЦБП)**

Из всех видов производств ЦБП основными источниками загрязнения воздушного бассейна являются сульфат- и сульфитцеллюлозные производства (табл.1.4). Основными источниками загрязнения атмосферы в сульфатцеллюлозном производстве являются: сордерегенерационный (СГ), варочно-промывной (ВП), известерегенерационный (ИР) и отбельный цеха, окислительная установка, цех приготовления отбельных растворов.

В зависимости от принятой схемы производства могут возникнуть дополнительные источники загрязнения из отделений цеха переработки побочных продуктов (очистки и дезодорации скипидара, получения одоранта сульфана; ректификации скипидара; разложения сульфатного мыла; ректификации таллового масла и др.).

Таблица 1.4

**Вредные вещества, попадающие в атмосферу на  
сульфатно-целлюлозном производстве**

Ингредиенты	Источник выбросов	ПДК, мг/м <sup>3</sup>
Пыль нетоксичная	Зола (сульфат и карбонат натрия) содорегенерационного котла, соли натрия из растворителей плава, пыль (соли кальция) из известерегенерационной печи	0.5
Диоксид серы	СРК, ИРП	0.5
Сероводород	Дымовые газы СРК, ИРП, парогазы РП	0.008
Метилмеркаптан	Сульфатно-целлюлозное производство	0.9*10 <sup>-9</sup>
Диметилсульфид		0.08
Диметилдисульфид		0.7
Метанол		1.0
Скипидар	Сульфатно-целлюлозное производство, производство побочных продуктов	2.0
Хлор	Цех отбелики сульфатно-целлюлозного производства	0.1
Оксид углерода	Утилизационные котлы, СРК, ИРП	5.0

В варочно-промывном цехе имеется несколько источников выбросов. При периодическом методе варки с терпентинной сдувкой вместе с паром удаляются: остаточный воздух из щепы, скипидар, сероводород, метилмеркаптан (ММ), диметилсульфид (ДМС), диметилдисульфид (ДМДС). Парогазовая смесь терпентинной сдувки, от которой в щёлкоуловителях отделяются захваченные капельки щёлока, конденсируется в теплообменниках. Отсюда непрерывно удаляются несконденсировавшиеся газы, количество и состав которых зависит от вида вырабатываемой целлюлозы, расхода щёлочи на варку, а также от температуры воды, подаваемой на теплообменник.

Задачей варки является более полное выделение целлюлозного волокна из древесной ткани в неповрежденном виде. Выделение целлюлозного волокна из древесной ткани основано на том, что лигнин вследствие наличия в нем разнообразных реакционно-активных функциональных групп более легко по сравнению с целлюлозой и гемицеллюлозами поддается разрушительному действию щелочных, кислотных и окислительных химических реагентов. Кроме того, характер распределения лигнина в древесной ткани способствует защите целлюлозы от реагентов до момента удаления его основной массы, после чего целлюлоза становится более доступной по отношению к действию реагентов и также начинает разрушаться. По мере уменьшения содержания лигнина в клеточной стенке скорость его удаления замедляется, а скорость разрушения целлюлозы увеличивается и может достичь скорости удаления лигнина. Момент равенства наступает при достижении содержания лигнина в клеточной стенке 1—2 % по отношению к начальному его содержанию в древесине. Очевидно, что дальнейшее продолжение варочного процесса приводит лишь к значительному разрушению целлюлозы и ухудшению ее свойств. Поэтому варку заканчивают до достижения указанного момента, обычно руководствуясь заданной жесткостью (остаточным содержанием лигнина) получаемого волокнистого полуфабриката.

Многообразие связей в полимолекуле лигнина, возникающих между отдельными структурными элементами при образовании его полимолекулы, обуславливает их различную устойчивость к действию химических реагентов. Для действия водных растворов щелочей и кислот при повышенной температуре наиболее уязвимы преимущественно простые эфирные связи, по которым полимолекулы лигнина распадаются на отдельные фрагменты, способные растворяться и переходить из клеточной стенки в варочный раствор. Такой тип реакций относится к реакциям гидролитической деструкции, обуславливающим растворение и удаление лигнина [88, 89, 90].

В образующихся фрагментах освобождаются фенольные гидроксильные группы и появляются активные группировки бензильного спирта со свободным фенольным гидроксильным, которые способны к реакциям конденсации лигнина (объединению фрагментов лигнина между собой) под действием тех же катализаторов — кислот и щелочей. Реакции конденсации приводят к образованию новых прочных углерод-углеродных связей, увеличивающих молекулярную массу лигнина и резко снижающих его растворимость и реакционную способность.

Повышение температуры и концентрации щелочи или кислоты усиливает реакции конденсации, которые при высокой температуре становятся преобладающими над реакциями гидролитической деструкции лигнина. Следовательно, в противоположность реакциям гидролитической деструкции реакции конденсации препятствуют растворению и удалению лигнина.

Достигнув определенной степени сульфидирования (сульфонирования), лигнин начинает растворяться и переходить в варочный раствор. Интенсивному удалению лигнина из древесной ткани способствует высокая температура варки, которая в этот момент достигает своего максимального значения. На более ранних стадиях варки лигнин удаляется преимущественно с вторичной стенки, а затем происходит удаление лигнина из межклеточного вещества. К концу варки лигнин межклеточного вещества почти полностью растворяется, древесная ткань распадается на отдельные клетки, в стенках которых еще остается некоторое количество лигнина — остаточный лигнин [15, 7, 5, 6, 8].

Целлюлоза и гемицеллюлозы не остаются безучастными в варочных процессах. Гемицеллюлозы большей частью (особенно легкогидролизуемые) разрушаются и переходят в варочный раствор. Частично также разрушается и целлюлоза, но варку всегда стремятся вести так, чтобы она выделялась полнее и в менее поврежденном виде. В целлюлозах, предназначенных для производства бумаги, стремятся по возможности больше сохранить гемицеллюлозы.

К основным факторам варки относятся: температура; расход активной щелочи на варку и концентрация ее в варочном растворе; сульфидность белого щелока; порода и качество древесины [61, 64, 63, 108].

Температура варки — это легко изменяемый и наиболее действенный фактор, влияющий на скорость делигнификации и, следовательно, определяющий продолжительность варки. В практике руководствуются следующим правилом: при повышении температуры варки на каждые 10°С продолжительность варки до одинакового выхода полуфабриката из древесины сокращается вдвое. Интервал температур, используемый при сульфатных варках, равен 165—185 СС. Температура ниже этого интервала существенно удлиняет варку, а выше — значительно снижает выход и качество целлюлозы.

Для нормального хода варки необходимо иметь избыток щелочи, составляющий 50—100 % теоретически необходимого расхода. Увеличение степени делигнификации требует повышения расхода щело-



чи. Повышение расхода щелочи в 2 раза в интервале выходов 40—50% сокращает продолжительность варки до одинаковой степени делигнификации вдвое.

Увеличение концентрации щелочи вдвое так же, как и ее расхода, сокращает продолжительность варки до одного и того же выхода вдвое. Одновременное увеличение расхода и концентрации щелочи сокращает продолжительность варки до достижения одинаковой степени делигнификации примерно в 4 раза.

Сульфидность белого щелока в пределах 16—40 % положительно сказывается на результатах варки. Увеличение сульфидности ускоряет варку, повышает прочность и равномерность провара целлюлозы, уменьшает содержание в ней остаточного лигнина [50, 54, 39, 87, 114].

Порода и качество древесины оказывают непосредственное влияние на сульфатную варку. Из ели и сосны получается примерно равноценная по качеству сульфатная целлюлоза, но выход целлюлозы из ели на 1—1,5 % выше. Выход целлюлозы из березовой древесины на 1—2 % выше, чем из еловой, а из осины несколько ниже (примерно на 2 %), что объясняется различной объемной массой древесины и химическим составом. Варку целлюлозы проводят по определенному режиму, для характеристики которого используют температурный график, изображаемый в координатах продолжительность - температура.

На рис. 1.3 показан температурный график сульфатной варки жесткой небеленой целлюлозы. Все время варки условно разделяется на два периода: заварку - подъем температуры в котле от начальной (50°C) до конечной температуры варки (168°C) - и стоянку на конечной температуре (собственно варку). Одновременно с подъемом температуры (кривая 1) поднимается и давление пара в котле (кривая 2).

Назначение заварки — равномерная по всей толще пропитка щепы варочным щелоком до достижения конечной температуры варки. В период заварки из щепы удаляется воздух и образуются летучие продукты: скипидар, метиловый спирт, метилсернистые соединения, которые затрудняют подъем температуры до конечной. Поэтому часть парогазовой смеси удаляют через сдувочный патрубок — производят так называемую терпентинную сдувку. Начинают ее при температуре 120—130°C и продолжают до конечной, на что указывает излом ветви подъема температуры на графике (см. рис. 1.1.). Продукты сдувки направляют на специальные установки, где из них выделяют скипидар,

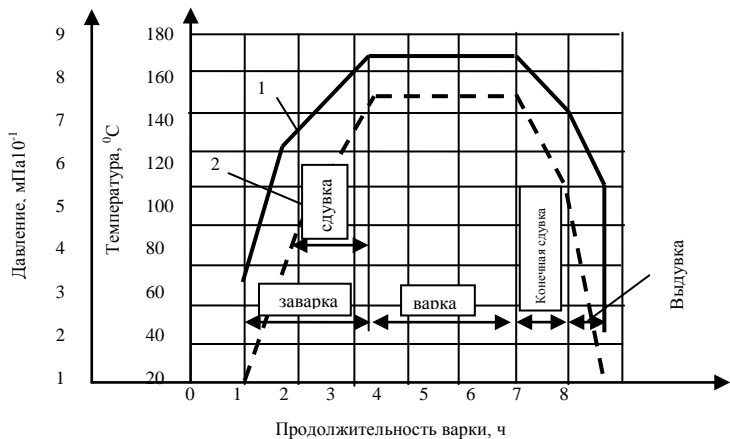


Рис. 1.3. Температурный график сульфатной варки небеленой целлюлозы: 1 – температура; 2 - давление

метилловый спирт и др. Эти газы обуславливают специфический неприятный запах сульфатцеллюлозного производства. Во избежание загрязнения воздушного бассейна дурнопахнущие газы необходимо улавливать и обезвреживать. Конденсат, полученный при улавливании летучих метилсернистых соединений, под названием сульфана используют для придания запаха бытовому газу.

Процесс варки начинается с момента достижения в котле конечной температуры, заданной по технологическому режиму (168°C). При конечной температуре котел выдерживается предусмотренное температурным графиком время. В период варки подача пара в подогреватель щелока сокращается, а циркуляция щелока продолжается до конца варки. Варка осуществляется главным образом за счет тепла, выделяемого протекающими химическими реакциями. Свежий пар расходуется для компенсации потерь тепла и стабилизации процесса. В этот период интенсивно растворяется и переходит в варочный щелок лигнин клеточных стенок, межклеточного вещества и другие продукты разрушения древесины.

Уровень твердой фазы (щепок) за счет уплотнения снижается, и к концу варки в котле образуется целлюлозная масса. Целлюлозные волокна в ней большей частью удерживаются в форме щепок. Окончание варки определяют, руководствуясь температурой и временем заданного режима, а также по пробе массы, отобранной в конце варки через специальный штуцер.

После окончания варки котел освобождают выдувкой целлюлозной массы в выдувной резервуар или промывной диффузор с рабочего давления (1-й метод) или с пониженного давления (2-й метод). По 2-му методу давление в котле с рабочего 0,83—0,85 МПа снижают до 0,4—0,5 МПа, делают так называемую конечную сдвuku и с этого давления проводят выдувку. На большинстве целлюлозных заводов конечную сдвuku не производят и выдувают массу из котла в выдувной резервуар с полного рабочего давления.

Выдувной резервуар — это приемная емкость, в которой накапливается перед промывкой масса из котлов и выделяются пары вскипания, образующиеся в большом объеме при выдувке. Пары вскипания отводятся в теплоулавливающую установку, а масса концентрацией 11—12% поступает в рабочий объем резервуара. Выдувной резервуар рассчитан на рабочее давление 0,1 — 0,11 МПа. При большем числе варочных котлов устанавливают два выдувных резервуара.

### 1.1.3. Специфические особенности термохимических методов переработки древесины

В настоящее время в мировой промышленной практике используют десятки различных устройств и технологических схем термической переработки древесины, конструктивные особенности которых определяются требованиями к охране природной среды [168, 172].

Термохимические методы, согласно диаграмме, представленной на рис. 1.4, делятся на 4 основных направления: сжигание, пиролиз, газификация, термомодификация. Эти процессы, хотя и отличаются друг от друга только количеством вводимого кислорода в камеру термиче-

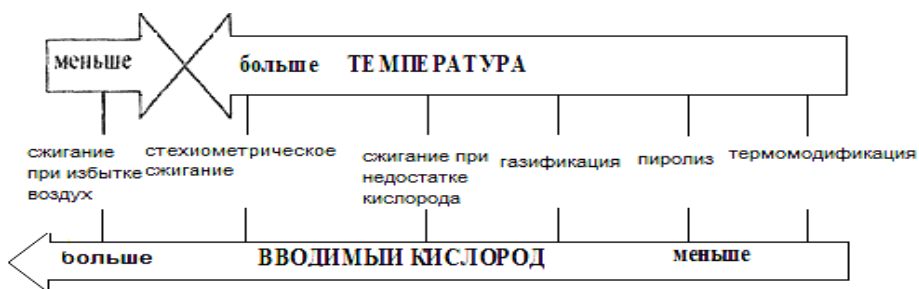


Рис. 1.4. Сравнительная диаграмма термохимических процессов

ской перербот ки и температурой, образующейся при этом, имеют различное аппаратурное оформлнение и представляют собой весьма сложные явления, включающие множество связанных между собой физико-механических и химических процессов, таких как: тепломассообмен, фазовые переходы, процессы переноса в реагирующих газовых смесях и движение среды. При этом химические процессы представляют собой реакции, состоящие из целого ряда элементарных взаимодействий.

Процесс горения можно охарактеризовать как нестационарный турбулентный тепломассообмен при наличии динамических источников тепла и вещества. Хотя такое представление и определяет пути анализа процессов горения, но конкретное решение задач теории горения при этом затруднено. При решении задачи горения топлива в слое процесс сжигания, как правило, рассматривают как совокупность стадий прогрева, термического разложения и выгорания коксового остатка. При этом процесс сжигания твердого топлива в слое представляется в следующем виде. Топливо, содержащее углерод, влагу, золу и большое количество различных углеводородных соединений, при попадании в топочную камеру и нагревании выделяет в окружающий объем влагу и летучие, в результате чего остается твердый остаток - кокс, состоящий из углерода и золы.

Выбросы, образующиеся при неполном сгорании, могут быть вызваны:

- неправильным смешением воздуха и топлива в топливной камере, в результате чего образуются локальные зоны с недостатком воздуха;
- недостаточным количеством кислорода;
- низкой температурой горения;
- недостаточным временем пребывания в камере сгорания.

Горение биомассы представляет собой сложный процесс со многими переменными, которые прямо или косвенно воздействуют на уровни выбросов и эффективность использования энергии [126].

Теплообмен может осуществляться посредством передачи, конвекции и излучения теплоты. Для обеспечения низкого уровня выбросов при неполном сгорании топлива необходимо минимизировать потери тепла в топочной камере посредством оптимизации переменных характеристик, оказывающих прямое воздействие на механизмы теплопередачи. Значительное количество теплоты аккумулируется в стенках топочной камеры, забирающих теплоту из объема топочной камеры на первоначальном этапе процесса горения. Это явление играет особенно

важную роль при сжигании биомассы в установках малой мощности. Температура топочной камеры может быть значительно повышена путем предварительного подогрева воздуха. Подаваемый воздух может быть предварительно подогрет посредством теплообмена с топочным газом после выпуска последнего из топочной камеры.

Любое топливо требует использования соответствующего количества воздуха (кислорода), с тем чтобы обеспечить его стехиометрическое преобразование, то есть коэффициент избытка воздуха должен быть равен 1. Стехиометрическое преобразование топлива происходит, когда используется точное количество кислорода, необходимое для преобразования всего топлива при идеальных условиях. В случае со сжиганием биомассы коэффициент избытка воздуха должен значительно превышать 1, чтобы обеспечить эффективное смешение подаваемого воздуха и топливного газа [73].

Значение уровня влажности, является одной из важнейших характеристик топлива. В установках периодического действия содержание влаги непрерывно изменяется в зависимости от степени выгорания топлива. Влага высвобождается на этапе выхода летучих веществ, и ее содержание уменьшается по мере выгорания топлива. Поэтому негативное воздействие уровня влажности на процесс горения может быть значительным на первых этапах фазы выхода летучих веществ, что может приводить к повышению уровня выбросов от неполного сгорания топлива. В табл.1.5 приведены возможные варианты повышения КПД установок, предназначенных для сжигания биомассы. Чем выше КПД топочных устройств, тем ниже выбросы топочных веществ в атмосферу.

Эффективной мерой повышения эффективности установки сжигания является снижение содержания избыточного кислорода в топочном газе. Существует два технологических варианта снижения коэффициента избытка воздуха с одновременным обеспечением полного сгорания топлива. Одним из таких вариантов является установка кислородного датчика, соединенного с датчиком окиси углерода в потоке топочного газа на выходе из котла, с целью оптимизации подачи вторичного воздуха [197].

Второй вариант предусматривает повышение качества смешения топочного газа с воздухом топки.

Путем снижения концентрации избыточного кислорода в топочном газе снижается объем самого газа, что позволяет уменьшить размеры котлоагрегатов и скрубберов топочного газа [189]. При этом необходимо

обеспечить, чтобы снижение концентрации избыточного кислорода в топочном газе сопровождалось повышением температуры горения, а это, в свою очередь, требует использования эффективной системы контроля температуры в топке.

Таблица 1.5

**Влияние различных мер  
на повышение теплового КПД установок**

№ п/п	Меры	Потенциальное повышение теплового КПД
1	Подсушка со снижением влажности с 50 до 30 %	+8,7 %
2	Снижение содержания O <sub>2</sub> в топочном газе на 1 %	Около +0,9%
3	Снижение содержания золы с 10,0 до 5,0 %	+0,3%
4	Снижение температуры топочного газа на выходе из котла на 10 °С	+0,8%
5	Конденсация топочного газа	Среднее + 17%; Максимальное +30%

Наиболее эффективным и во многих случаях экономически оправданным методом утилизации энергии топочного газа является метод его конденсации. Кроме того что этот процесс обладает высоким потенциалом утилизации энергии (до 20% от потребленной энергии топливной биомассы по отношению к НТС), он также обеспечивает высокую степень осаждения пыли (40-75%) и позволяет предотвратить конденсирование топочного газа на поверхности дымовой трубы при температуре окружающей среды до - 10°С. Основной недостаток процесса сжигания в том, что не обеспечивается экологическая чистота процесса, так как при сгорании отходов, загрязненных различными полимерными включениями, происходит выделение с топочными газами в атмосферу различных токсичных и высокотоксичных веществ. Все это приводит к необходимости внедрения дорогостоящих систем газоочистки, что экономически нерационально.

В процессе пиролиза выделяются окись и двуокись углерода, газообразные углеводороды (предельные и непредельные), водород, вода (не только влага древесины, но и продукт химического распада ее компонентов), кислоты (муравьиная, уксусная и в небольшом количестве высшие кислоты того же ряда), метанол, кетоны, эфиры. Все эти вещества удаляются в форме парогазовой смеси. В ней в капельной фазе (в форме тумана) находятся и смолистые вещества. Эти смолистые вещества по признаку растворимости в водном конденсате из парогазовой смеси (жидке) делятся на растворимую и отстойную смолы. Растворимая часть в основном состоит из осколков целлюлозы и гемицеллюлоз углеводного и углеводородного характера, но содержит и простейшие фенолы, растворимые в жидке, кислоты. Отстойная смола получается главным образом за счет распада лигнина и содержит вещества фенольного характера, нейтральные соединения различной структуры, кислоты.

Темпы выделения разных компонентов различны. Первыми выделяются те вещества, которые образуются за счет отщепления боковых цепей полимеров древесины и распада термически непрочных ее компонентов (камеди, гемицеллюлозы и т.д.). В последнюю очередь разрушается лигнин. Распад имеет характер цепи превращений. Процесс существенно зависит от начальной влажности, которая изменяется от 75% для только что доставленной сплавом древесины, до 15% для воздушно-сухой древесины [79].

Газификация представляет собой высокотемпературный термохимический процесс взаимодействия органической массы с газифицирующими агентами, в результате чего образуются горючие газы.

В зависимости от расположения места подачи воздушного дутья и места выхода газа различают три типа газогенераторов [55,39]:

- газогенераторы противоточного процесса газификации;
- газогенераторы прямоточного процесса газификации;
- газогенераторы перекрестного процесса газификации.

К недостаткам газогенераторов противоточного процесса газификации относят плохое качество переработки смол, содержащихся в отходах [25, 188]. Наличие в генераторном газе большого количества неразложившихся смол делает его непригодным для использования в горелочных устройствах, так как при охлаждении газа смолы конденсируются в газопроводах, нарушая тем самым их работу.

Перерабатывать смолы, содержащиеся в отходах, способен газо-

генератор прямоточного типа. В газогенераторе данного типа воздух подается в среднюю по его высоте часть, в которой происходит процесс горения. Образующиеся при этом газы отводятся снизу. Таким образом, активная зона занимает часть газогенератора от места подвода воздуха до колосниковой решетки, ниже которой расположен зольник с газоотводным патрубком. Зона сухой перегонки (пиролиза) и зона подсушки располагаются, как и в первом случае, выше активной зоны и обогреваются теплом, излучаемым зоной горения. Однако пары воды и летучие, образованные в процессе сушки и пиролиза, не могут выйти из газогенератора, минуя зоны горения и восстановления. Проходя через зону горения, имеющую высокую температуру, продукты сухой перегонки подвергаются разложению, в результате чего количество смол в газе значительно уменьшается.

При перекрестном процессе газификации воздушное дутье подается сбоку в нижней части газогенератора с одной стороны, а образующаяся парогазовая смесь (генераторный газ) отводится через отводную решетку с противоположной стороны. По механизму процессов газификации, термохимического разложения и подсушки процесс газификации с перекрестным дутьем занимает промежуточное положение между противоточным и прямоточным процессами.

Активная зона сосредоточена на небольшом пространстве между концом фурмы подачи дутья и газоотводной решеткой. Над активной зоной располагаются зона сухой перегонки, и выше - зона подсушки топлива. Однако этот газогенератор, как и газификатор противоточного типа, непригоден для газификации отходов с большим содержанием летучих и смол, так как не может обеспечить образования бессмольного газа [168].

Генераторные газы, получаемые в генераторах, работающих по прямоточному процессу газификации, имеют более широкие области непосредственного энергетического и технологического использования, чем генераторные газы, получаемые в результате противоточного процесса [101, 73]. Это объясняется меньшим количеством активных и вредных примесей в генераторных газах прямоточного процесса, поскольку большая часть этих примесей термически разлагается под действием высоких температур при прохождении через зону горения и газификации. Кроме того, часть остающихся термостойких примесей собирается на поверхности частиц золы и шлаков, образующихся из минеральной части исходных твердых топлив.